

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS
LICENCIATURA EN ELECTRÓNICA.



DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALTO VOLTAJE PARA
ACELERADORES DE PARTÍCULAS

TESIS
QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
Licenciado en electrónica

PRESENTA:
Juan Francisco Verdugo Arredondo

DIRECTOR:
Dr. Carlos Duarte Galván
Dr. Cristhian Alfonso Valerio Lizárraga

Culiacán, Sinaloa, 2019

*A mi esposa Mariana Gonzalez Acosta. A mis padres, Martha Aidé Arredondo Solís y Francisco Verdugo Fierro. A mis hermanos Dulce Esmeralda Verdugo Arredondo y Néstor Javier Espino Arredondo. Por ayudarme a crecer en cada aspecto de mi vida.
Yo.*

Reconocimientos

También quiero agradecer a mis grandes maestros que me enseñaron que la sabiduría se encuentra en la motivación y el trabajo duro, Dr. Carlos Duarte Galván, Dr. Cristhian Alfonso Valerío Lizárraga, Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz, etc.. A mi Universidad, sus instituciones y al personal administrativo, por abrirme las puertas a esta gran casa de estudio, al Parque de Innovación Tecnológico, por haberme formado de la mejor manera posible y por la infinidad de oportunidades que se abren tras el conocimiento que se me ha otorgado. Sin mas ¡GRACIAS!

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Juan Francisco Verdugo Arredondo. Culiacán, Sinaloa, 2019

Índice general

Índice de figuras	xI
1. Resumen	1
1.1. Antecedentes y justificación	1
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Hipótesis y objetivos	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivo Particular	5
1.3.3. Hipótesis	5
1.4. Estructura de la tesis	6
2. Marco teórico	7
2.1. Fuentes de voltaje en aceleradores de partículas	7
2.1.1. Etapa de transformador monofásico	10
2.1.2. Rectificador monofásico de onda completa	12
2.1.3. Filtros	13
2.1.4. Regulador	15
2.2. Inversores de voltaje	17
2.2.1. Parámetros de desempeño de un inversor	17
2.3. Multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton	20
2.4. Aplicaciones de fuentes de alto voltaje	21
2.4.1. Sistemas de encendido.	21
2.4.2. Generación de rayos X	23
3. Metodología	27
3.1. Materiales utilizados	28
3.2. Diseño del hardware	31
3.2.1. Hardware de interface	32
3.2.2. Hardware de fuente de voltaje a 180w	33
3.2.3. Hardware inversor	39
3.2.4. Multiplicador de voltaje Cockcroft Walton	41
3.3. Firmware	44
3.3.1. Interface gráfica	44
3.4. Implementación del Hardware	48
3.4.1. Fuente de 180W	49
3.4.2. Inversor de voltaje	54
3.4.3. Multiplicador de voltaje	56

ÍNDICE GENERAL

4. Análisis de Resultados	61
4.1. Resultados	61
4.1.1. Análisis espectral	62
5. Conclusiones	69
A. Código/Manuales/Publicaciones	71
A.1. Código pantalla táctil	71
A.2. Diagrama electrónico IBT-2	84
Bibliografía	85

Índice de figuras

2.1. Diagrama esquemático de las componentes principales de un acelerador de partículas. (?)	9
2.2. Principio de funcionamiento de un transformador monofásico. (15)	11
2.3. Simbología de un transformador monofásico.	11
2.4. Simbología de un transformador monofásico.	12
2.5. Puente de Graetz o Puente Rectificador de doble onda.	13
2.6. Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de DC y de rizo.	14
2.7. Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de DC y de rizo.	15
2.8. Reproducción del voltaje V_o y el rizo δV en la carga del circuito.	18
2.9. Circuito en cascada Cockcroft-walton de media onda.	20
2.10. Inducción electromagnética.	21
2.11. Inducción electromagnética 2.	22
2.12. Estructura básica de un transformador de encendido. (22)	23
2.13. Tubo de rayos x (24)	24
3.1. Sonda de alto voltaje	28
3.2. Multímetro Fluke 116 0.001V de resolución.	29
3.3. Osciloscopio teledyne lecroy 8 bits de resolución.	29
3.4. Router CNC LPKF para maquinado de PCBs.	30
3.5. Topología de fuente de alto voltaje	31
3.6. Diseño esquemático de fuente 180w	34
3.7. Seguidor de voltaje transistor NPN	35
3.8. Arreglo Darlington de transistores NPN	36
3.9. Simulación en LTSPICE fuente 180w	37
3.10. Simulación fuente regulable en LTSPICE	38
3.11. Diseño placa de fuente de regulable de 180w	38
3.12. Placa de desarrollo, puente H IBT-2(23)	39
3.13. Placa de desarrollo, puente H IBT-2(23)	40
3.14. Multiplicador de voltaje 2 niveles	41
3.15. Multiplicador de voltaje sin carga	42
3.16. Multiplicador de voltaje con 1 mA de carga	42
3.17. Multiplicador de voltaje con 10 mA de carga	42
3.18. Multiplicador de voltaje con 10 mA de carga	45
3.19. Pantalla 1	47
3.20. Pantalla 2	48
3.21. Foto del sistema en general	49
3.22. Multiplicador de voltaje sin carga	50

ÍNDICE DE FIGURAS

3.23. Fuente 12V sin carga con error de 0.076V	52
3.24. Fuente 12V con carga a 7.5 OHMS con error de 0.076V	53
3.25. Fuente 12V con carga a 15 OHMS con error de 0.076V	53
3.26. Implementacion experimento inversor.	55
3.27. Implementación inversor salida con carga inductiva.	55
3.28. Implementación inversor	56
3.29. Implementación inversor	57
3.30. Medición sin carga a 93v con un error de 0.36V	57
3.31. Medición sin carga a 200V con un error de 0.78V	57
3.32. Medición sin carga a 600V con un error de 2.34V	58
3.33. Medición sin carga a 986V con un error de 3.85V	58
 4.1. Medición sin carga a 986V con un error de 3.85V	62
4.2. Medición de alto voltaje.	63
4.3. Zoom a señal de alto voltaje.	64
4.4. Transformada de fourier a señal de alto voltaje.	64
4.5. Transformada de fourier a señal de alto voltaje desplazada para observar frecuencias en 0 Hz.	65
4.6. Zoom de voltaje acoplado a capacitor.	66
4.7. Transformada de fourier de señal de voltaje acoplado a un capacitor. 100 KHz por división.	66
4.8. Transformada de fourier de señal de voltaje acoplado a un capacitor. 10 KHz por división.	67
4.9. Transformada de fourier de señal de voltaje acoplado a un capacitor. 1 KHz por división.	67
 A.1. diagrama puente H	84

Capítulo 1

Resumen

El trabajo de esta tesis consiste en el desarrollo de una fuente de alto voltaje de bajo ruido para su uso en aplicaciones de un acelerador de partículas lineal. Esta fuente está basada en la topología de los sistemas Cockcroft Walton (1), ademas incluyendo un sistema de inversor de voltaje y un rectificador del tipo multiplicador, así como también la introducción a un control del sistema con lazo cerrado e interfaces gráficas para el usuario donde mediante un computador se tiene la posibilidad de un control automatizado y del sistema en general.

Durante el desarrollo del sistema de alto voltaje se realizo el diseño del instrumento realizando una serie de simulaciones para encontrar el punto de operación óptimo previo a la fabricación. Como resultado nuestro sistema construido siguió fielmente los parámetros de las simulaciones y puede generar alto voltaje a 10 W de potencia con un factor de ruido por debajo del 1 %, ademas se realizo una comparación con fuentes de alto voltaje comerciales implementadas en aceleradores de partículas y reactores nucleares de baja potencia.

1.1. Antecedentes y justificación

Uno de los mayores avances tecnológicos de la humanidad ha sido el desarrollo de aceleradores de partículas, ya que tienen aplicaciones en las áreas médicas, militares y alimentarias (2),(3),(4). Los cuales aceleran los protones y electrones

1. RESUMEN

típicamente a energías de 10 MeV. Estos aceleradores son diseñados para funcionar de manera confiable produciendo haces de alta intensidad con un mínimo de intervención humana, he allí la meta en esta tesis.

En el pasado la radioterapia utilizaba agujas de radio o rayos gamma de cobalto radioactivo(5), la desventaja de este tipo de maquinaria es tener un funcionamiento ininterrumpido, con el pasar del tiempo su actividad decae y es necesario cambiar la fuente radioactiva, resguardarla del medio ambiente, pues esta representa un peligro para la población y un problema es la acumulación de estos materiales, ya que la contaminación es latente.(6)

Otro de los tantos ejemplos de las aplicaciones de estas tecnologías es en la rama de la fusión nuclear, ya que estas requieren fuentes de alto voltaje para su funcionamiento, en México existe desarrollo en esta área. En la parte experimental, en 1978 se inició un proyecto mexicano de fusión termonuclear y, en 1983, se propuso el diseño de una pequeña máquina experimental llamada “Novillo”(7). Este Tokamak fue diseñado y construido por trabajadores mexicanos del ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares)(8) en el Centro Nuclear de Salazar, México. Este tipo de máquinas permitió participar en una de las áreas de investigación en Física de Plasmas más prometedoras para el futuro energético. La infraestructura existente y la experiencia adquirida, permitirán contribuir al desarrollo de una futura aplicación de la energía nuclear de fusión, la cual será una fuente alterna de energía en el presente siglo.

Bajo la premisa de la ventaja del desarrollo tecnológico de los aceleradores de partículas para nuestro país, es necesario comenzar los estudios en estos temas, ya que las posibilidades de aplicación son bastas y de suma importancia. Con el pasar del tiempo las aplicaciones han aumentado considerablemente, desde ramas

de la medicina como ya lo mencionamos, hasta sistemas de aislamiento por campo magnético de plasmas y sistemas para aumentar temperaturas hasta puntos de fusión para sistemas de generación de energía en plantas de fusión nuclear, los mexicanos han apostado por la participación en el desarrollo de estas tecnologías.

Este trabajo de tesis pretende dar un pequeño acercamiento a temas relacionados con los ya antes mencionados, mediante el desarrollo de la instrumentación de una fuente de alto voltaje para un acelerador de electrones lineal, el cual se divide en varias etapas de desarrollo. La primera es el sistema de fuentes, nos hemos basado en el sistema Cockcroft-Walton (CW) (1932) (1) combinado con un inversor de voltaje de alta frecuencia incidente en un embobinado de ignición controlado digitalmente mediante un microcontrolador a lazo cerrado, el cual cuenta con una comunicación PC-HPS (HIGH POWER SUPPLY por sus siglas en inglés), permitiendo al usuario, mediante una retroalimentación, configurar la fuente de voltaje a los parámetros deseados, así como también guardar un registro en las variaciones de corriente y voltaje a la que nuestra fuente es sometida. (9)

1.2. Planteamiento del problema

Hoy en día el desarrollo de tecnologías que involucran aceleradores de partículas esta cada vez mas presentes en la vida diaria, en México ya existe participación en desarrollo de gran nivel, como lo es el Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ), lo cual brinda la posibilidad a los investigadores de involucrarse en este tipo de desarrollo para poder satisfacer las necesidades que se requieren.

El uso de aceleradores de partículas para aplicaciones medicas ha tenido gran auge en los últimos años, ya que las ventajas que tienen sobre las fuentes radioactivas son bastas, este hecho da la oportunidad a las universidades de preparar expertos en estos temas y diseñar maquinaria a medida, que cumpla las exigencias de la región. Aunque ya existen trabajos referentes a fuentes de alto voltaje, generación de electrones mediante telurio y detectores de estos mismos, la curva de aprendizaje necesaria para especializarse en estos temas es grande y dejar un precedente en nuestro país es necesaria y muy útil, es por ello que estas investigaciones son de gran importancia.

1.3. Hipótesis y objetivos

1.3.1. Objetivo General

Este trabajo tiene por objetivo desarrollar una fuente de alto voltaje de hasta 2 KV y 10 W de potencia.

1.3.2. Objetivo Particular

- Desarrollar de fuente de bajo voltaje.
 - Diseño de fuente de voltaje regulable a 180W.
 - Simulación de fuente de voltaje regulable.
 - Maquinado de fuente de voltaje regulable.
- Inversor de voltaje.
 - Diseño de driver modulador de ancho de pulso (PWM) bipolar para inversor.
 - Simulación de driver generador de PWM.
 - Construcción de driver (PWM) bipolar.
 - Diseño de interfaces gráficas para control de inversor.
- Etapa de alto voltaje.
 - Transformadores de alto voltaje.
 - Multiplicador de voltaje.

1.3.3. Hipótesis

El diseño adecuado de un sistema de generación de alto voltaje va a permitir el desarrollo de aplicaciones en aceleradores lineales.

1.4. Estructura de la tesis

Este trabajo está dividido en 5 capítulos. El primero habla sobre un resumen del trabajo realizado, el segundo es un marco teórico que pone en contexto el desarrollo del proyecto y expone las partes técnicas, en el capítulo 3 se expone el proceso y la metodología realizada, el capítulo 4 incluye un breve análisis de resultados el cual muestra una síntesis de las mediciones y el trabajo teórico, y por último un análisis de resultados.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Fuentes de voltaje en aceleradores de partículas

Después de la construcción del primer acelerador, en la misma década de los 30, se inventaron otros tipos de aceleradores tales como el ciclotrón, los aceleradores lineales y los aceleradores tipo Van de Graaff. Debido a que los primeros aceleradores de partículas se construyeron con el fin de estudiar experimentalmente la estructura del núcleo atómico, por medio de colisiones, las cuales podían originar transmutaciones o reacciones nucleares, esa fue la razón por lo que al hablar de un acelerador se asociaba automáticamente con un laboratorio de física nuclear. La importancia de estos instrumentos de física nuclear es similar a la del telescopio en astronomía o al microscopio en bacteriología.(10)

Actualmente el uso de los aceleradores se ha extendido a otras áreas de investigación básica como la física atómica el mundo de los electrones y en las partículas elementales. Los aceleradores en medicina se usan tanto en los departamentos de radiología, para destruir tumores malignos, como para producir radioisótopos que se utilizan en el diagnóstico de enfermedades (medicina nuclear). El uso de los aceleradores en aplicaciones tecnológicas es muy variado y el más conocido es en la industria de los semiconductores y de la nucleo-electrónica, las cuales

2. MARCO TEÓRICO

se usan un tipo especial de aceleradores conocidos como implantadores con los que es posible producir los chips electrónicos, circuitos integrados, etc. (11)

Los aceleradores son instrumentos relativamente complejos y su diseño y construcción requiere de alta tecnología e intervienen muchos campos de la ingeniería. Una forma de clasificar los aceleradores es por la energía de los proyectiles y los de alta energía o superaceleradores están instalados, por ejemplo en algunos laboratorios nacionales de los EUA, tal como, en Los Alamos, BrookHaven, FermiLab y en Europa en el CERN.

Las instalaciones de estos superaceleradores son impresionantes por su gran tamaño y los cientos de toneladas de materiales que se requirieron para su construcción. Por ejemplo, el acelerador en el FermiLab es circular y tiene un radio de 1 Km. Sin embargo los conceptos sobre los principios de operación de los superaceleradores y de los pequeños aceleradores son los mismos y son simples y se describen a continuación.

Un diagrama simplificado de un acelerador de partículas se muestra esquemáticamente en la figura 2.1 y cuyos elementos básicos son:

- 1) Sistema de vacío.
- 2) Cañón de electrones.
- 3) Fuente de energía de radio frecuencia.
- 4) Guia del acelerador.

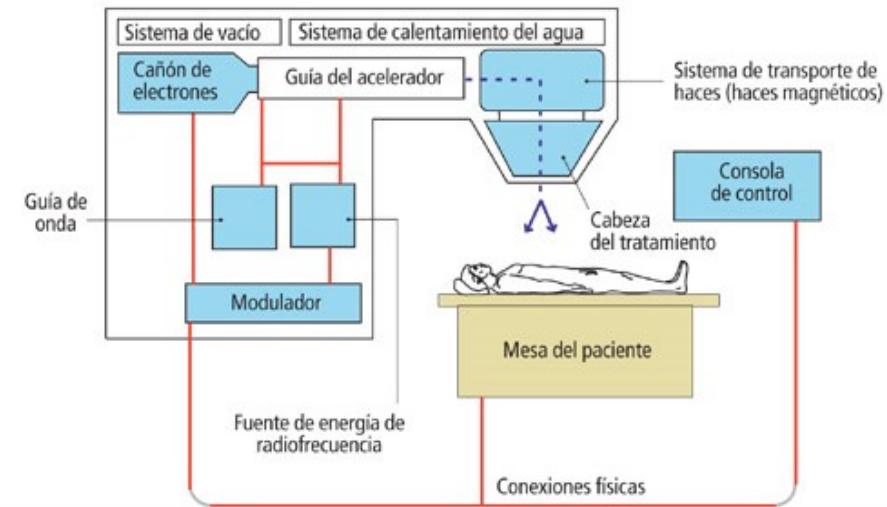


Figura 2.1: Diagrama esquemático de las componentes principales de un acelerador de partículas. (?)

El principio de funcionamiento de la mayoría de aceleradores, se basa en la interacción de los campos eléctricos producidos por fuentes de voltaje sobre la carga eléctrica de las partículas generadas en la fuente de iones.

Otras partes importantes asociadas a un acelerador son equipos periféricos tales como: sistemas de vacío, líneas de transporte de haz, cámaras de experimentación, etc. Un tubo de rayos X y el cinescopio de una TV según la definición anterior son aceleradores de partículas, sin embargo, en la práctica no se les refiere con este nombre.

Como se sabe, las unidades que se usan para la energía en física son los julios y/o ergios. Sin embargo, en el área de aceleradores, para cuantificar la energía de los proyectiles acelerados se acostumbra usar unidades de electrón-volt (eV) o sus múltiplos: el keV, el MeV, el TeV, etc. Una energía de 1 eV es el cambio de energía cinética que experimenta una partícula con carga en valor absoluto igual a la del electrón, después de pasar por una diferencia de potencial de un volt. (13)

2.1.1. Etapa de transformador monofásico

Esta etapa consta básicamente de un transformador que esta formado por un bobinado primario y uno o varios bobinados secundario, que tiene como función principal convertir la energía eléctrica alterna de la red, en energía alterna de otro nivel de voltaje, por medio de la acción de un campo magnético.

Los transformadores son maquinas eléctricas con dos devanados, en su forma mas básica. El devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundario. El devanado primario tiene N_1 espiras y el secundario tiene N_2 espiras. El circuito magnético de esta máquina lo constituye un núcleo magnético sin entrehierros, el cual no está realizado con hierro macizo sino con chapas de acero al silicio apiladas y aisladas entre sí. De esta manera se reducen las pérdidas magnéticas del transformador.

Al inducir una corriente sobre cualquiera de los dos devanados se genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético se describe mediante la Ley de Faraday y produce una fuerza electromotriz que da lugar a una tensión V_2 en los bornes de dicho devanado.

Normalmente, para un transformador reductor o un transformador elevador tienen dos devanados que se denominan de alta tensión y de baja tensión, siendo bobina primaria y bobina secundaria respectivamente. Un mismo transformador puede alimentarse por el lado alta tensión (A.T.) y funcionar como transformador reductor o alimentarse por el lado de baja tensión (B.T.) y actuar como un transformador elevador.

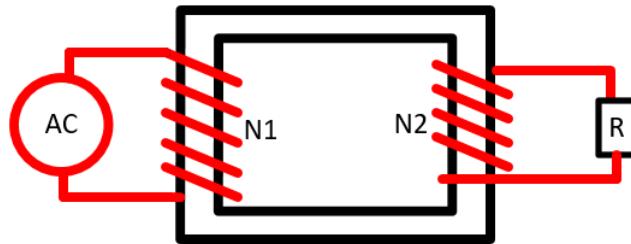


Figura 2.2: Principio de funcionamiento de un transformador monofásico. (15)

En la figura 2.6 podemos observar los símbolos mas comunes que representan al transformador.

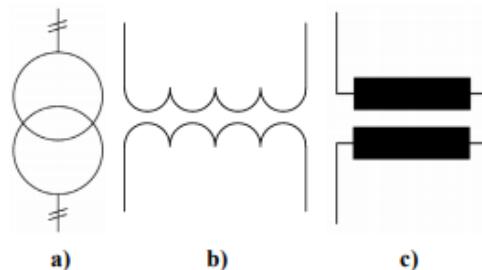


Figura 2.3: Simbología de un transformador monofásico.

Ahora podemos definir los valores asignados o nominales para el diseño de un transformador.

Las **tensiones asignadas o nominales** (V_1, V_2) son aquellas para las que se ha diseñado el transformador, estas tensiones son proporcionales al numero de espiras (N_1, N_2) de cada devanado.

La **potencia asignada o nominal** (S_N) la cual permite un funcionamiento sin calentamientos peligrosos en su funcionamiento normal. Cabe mencionar que los dos devanados siempre tendrán la misma potencia asignada.

2. MARCO TEÓRICO

Las **corrientes nominales o asignadas** (I_{1N}, I_{2N}) se obtienen a partir de las tensiones asignadas y de la potencia asignada. Así, en un transformador monofásico se tiene que:

$$S_N = V_{1N} * I_{1N} = V_{2N} * I_{2N} \quad (2.1)$$

La **relación de transformación** (m) es el cociente entre las tensiones asignadas del primario y del secundario:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} \quad (2.2)$$

Estudiando superficialmente los aspectos de construcción de un transformador, mediante estas ecuaciones podemos comenzar con la construcción y diseño. Debemos de considerar las potencias necesarias para nuestro proyecto y mediante ellas calcular el ancho del cobre y el tamaño del entre-hierro.(15)

2.1.2. Rectificador monofásico de onda completa

El circuito rectificador de onda completa genera una señal de corriente directa (D.C.) a partir de una señal de corriente alterna (A.C.) con todos los semiciclos de la señal, invirtiendo todos los semiciclos de una misma polaridad, para convertirlos a la otra.

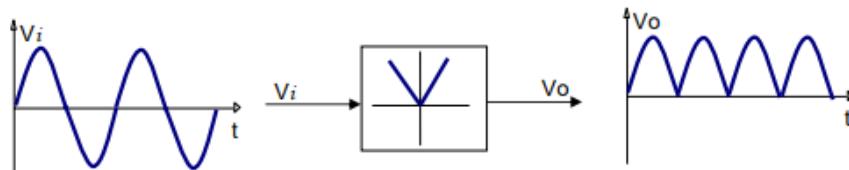


Figura 2.4: Simbología de un transformador monofásico.

Para calcular el voltaje de corriente directa(V_m) que obtendremos podemos utilizar la siguiente ecuación.(16)

$$V_{cd} = 2 * 0.636 V_m \quad (2.3)$$

En este caso se emplean cuatro diodos con la disposición como se ve en la figura 2.8. Al igual que antes, sólo son posibles dos estados de conducción, o bien los diodos 1 y 3 están en directa y conducen (tensión positiva) o por el contrario son los diodos 2 y 4 los que se encuentran en directa y conducen (tensión negativa). A diferencia del caso anterior, ahora la tensión máxima de salida es la del secundario del transformador (el doble de la del caso anterior), la misma que han de soportar los diodos en inversa, al igual que en el rectificador con dos diodos. Esta es la configuración usualmente empleada para la obtención de onda continua, que se rectifica.

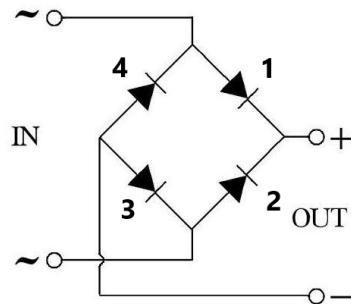


Figura 2.5: Puente de Graetz o Puente Rectificador de doble onda.

2.1.3. Filtros

El voltaje de CA por lo general se conecta a un transformador, el cual lo reduce al nivel de salida de DC deseado. Un rectificador de diodos proporciona entonces un voltaje rectificado de onda completa, el cual en principio se pasa por un filtro de capacitor sencillo para producir un voltaje de DC. El cual en todos los casos presenta un voltaje de rizo o variación de voltaje de CA. Para este proyecto se ha

2. MARCO TEÓRICO

seleccionado dicho filtro por su facilidad de construcción.

Para calcular el voltaje de rizo podemos utilizar un multímetro con capacidad de medir voltaje en CA (TRUE RMS) y el voltaje de DC. El voltmetro de CD leerá solo el nivel promedio. El medidor de CA (RMS) leerá solo el valor RMS del componente de ca del voltaje de salida, de esa manera podemos obtener V_{cd} y I_{cd} . Entonces, definimos el rizo como:

$$r = \frac{\text{voltaje de rizo (rms)}}{\text{voltaje de DC}} \times 100 \quad (2.4)$$

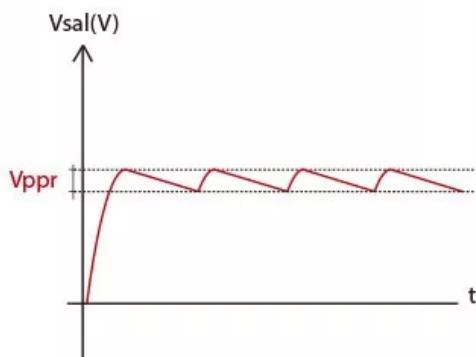


Figura 2.6: Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de DC y de rizo.

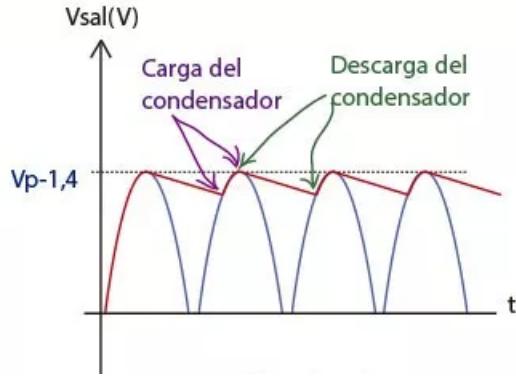


Figura 2.7: Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de DC y de rizo.

Para nuestro caso utilizaremos un filtro de capacitor. Se conecta un capacitor en la salida del rectificador a través del capacitor como se muestra en la figura 2.6 y 2.7. Podemos calcular el **voltaje del rizo** que obtendremos mediante la ecuación:

$$V_r(rms) = \frac{I_{cd}}{4\sqrt{3}fC} = \frac{2.4V_{cd}}{R_L C} \quad (2.5)$$

Donde I_{cd} y V_{cd} son la corriente y voltaje pico. Con la ecuación 2.4 podemos intuir y definir la expresión para el **rizo** de la forma de onda de salida de un rectificador de onda completa y el circuito de capacitor de filtrado:

$$r = \frac{V_r I_{cd}}{CV_{cd}} * 100 \% = \frac{2.4}{R_L C} \quad (2.6)$$

2.1.4. Regulador

Un factor de importancia en una fuente de alimentación es la cantidad de cambios de voltaje de salida de DC a lo largo de la operación de un circuito. El voltaje provisto a la salida en la condición sin carga (sin que demande corriente de la fuente) se reduce cuando se extrae corriente de carga de la fuente. La cantidad que el voltaje de DC cambia entre las condiciones sin carga y con carga la describe un factor llamado regulación de voltaje, para una fuente ideal la regulación de

2. MARCO TEÓRICO

voltaje seria del 0 %. Entonces podemos definir la regulacion de voltaje como:

$$\begin{aligned} \text{Regulación de voltaje} &= \frac{\text{Voltaje sin carga} - \text{Voltaje con carga}}{\text{voltaje con carga}} \\ \%V.R. &= \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} * 100 \% \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2. Inversores de voltaje

Los convertidores DC a AC se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de DC a un voltaje simétrico de salida de AC de magnitud y frecuencia deseada.

Los inversores se pueden clasificar ampliamente en dos tipos: inversores monofásicos e inversores trifásicos. Cada tipo puede usar dispositivos de encendido y apagado controlados, por ejemplo por transistores de unión bipolar (BJT), transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor(MOSFET), transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), etc. Por lo general estos inversores utilizan señales de control de modulación por ancho de pulso (PWM) para producir un voltaje de salida de CA.

Existen diferentes tipos de inversores, un inversor se conoce como inversor alimentado por voltaje (VFI) si el voltaje de entrada permanece constante; inversor alimentado por corriente (CFI) si la corriente de entrada permanece constante, e inversor enlazado en cd variable si el voltaje de entrada es controlable. Si al voltaje o a la corriente de salida del inversor se le hace pasar a través de cero al crear un circuito LC resonante, a este tipo de inversores se le conoce como inversor de pulso resonante, y tiene vastas aplicaciones en la electrónica de potencia.

2.2.1. Parámetros de desempeño de un inversor

El voltaje de entrada a un inversor es de DC y el voltaje de salida de AC. Idealmente la salida debe de ser una onda sinusoidal pura, pero contiene armónicos o ríos como se observa en la figura 2.8. El inversor consume corriente de la fuente de entrada de DC solo cuando se conecta la carga al sistema, afectando la calidad de la señal de salida, es por ello que una medición variará conforme se conecte

2. MARCO TEÓRICO

una carga diferente. Por lo común la calidad de un inversor se evalúa en función de parámetros de desempeño.

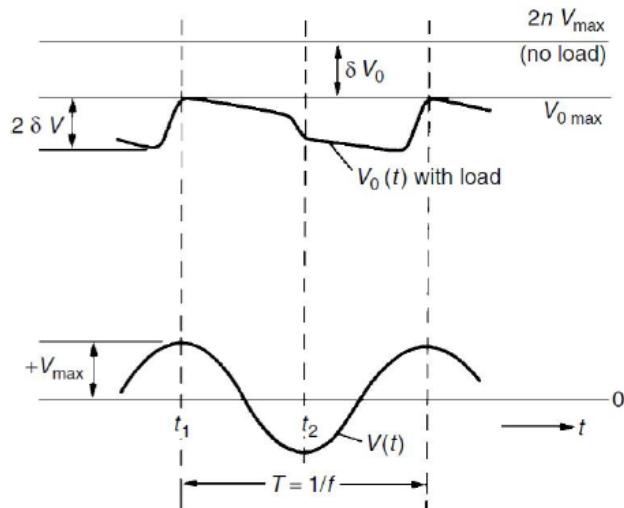


Figura 2.8: Reproducción del voltaje V_o y el rizo δV en la carga del circuito.

La potencia de salida esta dada por:

$$P_{ca} = I_0 V_0 \cos \theta \quad (2.8)$$

$$P_{ca} = I_0^2 R \quad (2.9)$$

Donde V_0 e I_0 son el voltaje y corriente RMS de la carga, θ es en angulo de la impedancia de la carga y R es la resistencia de la carga.

La potencia de entrada de ca del inversor es:

$$P_S = I_S V_S \quad (2.10)$$

donde V_S e I_S son el voltaje y la corriente promedio de entrada.

El contenido de rizo rms de la corriente de entrada es:

$$I_R = \sqrt{I_I^2 - I_S^2} \quad (2.11)$$

donde I_I e I_S son los valores rms y promedio de la corriente de suministro de corriente directa.

2.3. Multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton

Cockcroft-Walton es un multiplicador de voltaje desarrollado para fines nucleares (17). Este generador consiste en un arreglo en cascada de diodos y capacitores para generar alto voltaje en CD mediante una entrada de voltaje en CA. El sistema Cockcroft-Walton es usado principalmente en aceleradores de partículas, pero también en sistemas láser, tubos CRT, LCDs, fuentes de voltaje y sistemas de rayos X. Podemos observar el sistema en cuestión en la figura 2.9.

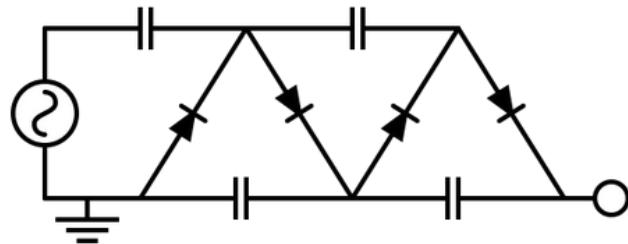


Figura 2.9: Circuito en cascada Cockcroft-walton de media onda.

El sistema multiplicador es bastante sencillo pero existen algunos temas imprescindibles los cuales tenemos que estudiar a profundidad, ya que el funcionamiento fundamental de un capacitor es la carga y descarga del mismo, es por ello que los parámetros del componente deben de ser calculados metódicamente.

$$\delta V = \frac{i}{fC} \frac{n(n+1)}{4} \quad (2.12)$$

Donde i es la corriente y n es el numero de etapa del multiplicador. Es por ello que mediante un análisis matemático debemos de hacer el cálculo de la respectiva δ del mismo.

No solamente la calidad de la salida depende de lo antes mencionado, ya que, para un correcto funcionamiento necesitamos realizar un sistema de entrada estable y constante. De aquí el siguiente estudio.

2.4. Aplicaciones de fuentes de alto voltaje .

Los transformadores de alto voltaje son utilizados ampliamente en sistemas tanto industriales, médicos como de investigación. Una de estas tantas aplicaciones son los sistemas de ignición, ya que, por el alto voltaje que tenemos en el secundario se producen arcos eléctricos en situaciones controladas, que pueden servir para ignición de combustoleos. En el área de la medicina también se utiliza de manera importante en sistemas de generación de ozono, rayos X, entre tantas otras cosas más.

2.4.1. Sistemas de encendido.

Cuando las líneas de fuerza de un campo magnético son atravesadas por un conductor (alambre) en movimiento, se crea en éste una corriente eléctrica. Este fenómeno es conocido con el nombre de inducción electromagnética.

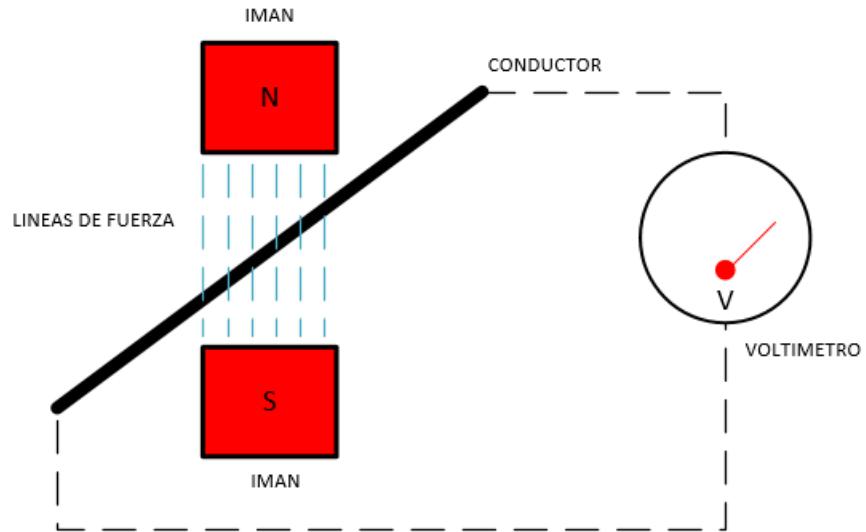


Figura 2.10: Inducción electromagnética.

2. MARCO TEÓRICO

“Este fenómeno se manifiesta de igual manera ya sea que se mueva el campo magnético, el conductor o ambos. Obviamente, el voltaje inducido en el conductor variará según la intensidad del campo magnético pero también tendrá que ver la velocidad con que se mueva el conductor o el campo magnético. Asimismo, si enrollamos el conductor formando una bobina y con ella interrumpimos las líneas de fuerza, el voltaje en el conductor se multiplicará tantas veces como vueltas del alambre pasen a través del campo.”

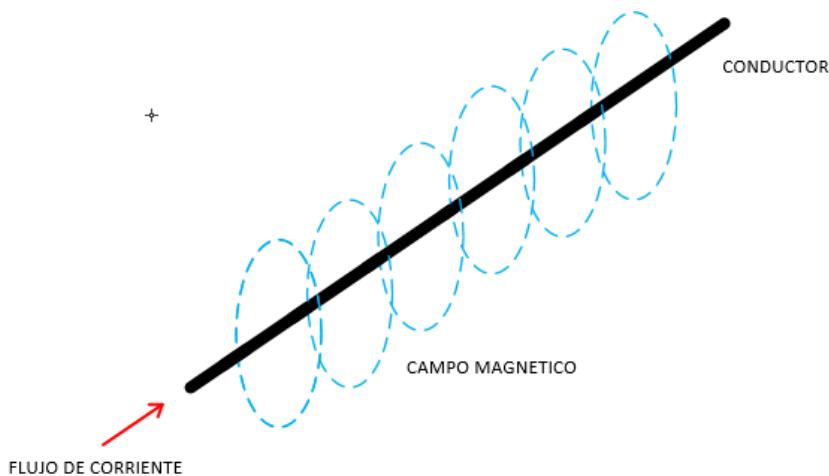


Figura 2.11: Inducción electromagnética 2.

En la figura 2.12 se aprecia la estructura básica de un transformador de encendido. La corriente de la batería (12V) fluye por la bobina primaria y crea un campo magnético que se concentra en el núcleo y envuelve el secundario. Al interrumpirse la corriente por medio del sistema electrónico de encendido, el campo se colapsa hacia el núcleo férrico atravesando en su camino al secundario donde se induce un elevado voltaje (35 000 V aprox.) Este proceso de carga y descarga del transformador se repite tan rápido como lo requiera el régimen del motor para el

encendido de las bujías

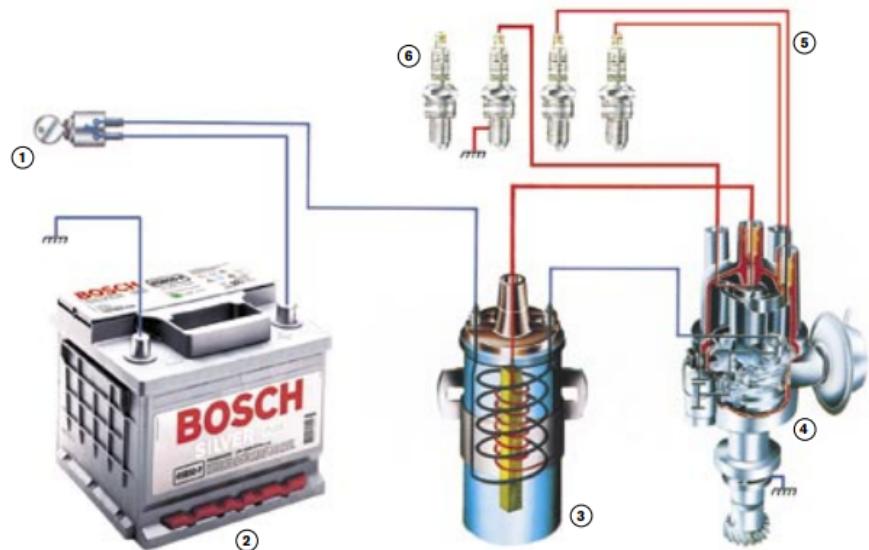


Figura 2.12: Estructura básica de un transformador de encendido. (22)

El encendido electrónico es un concepto muy amplio pues existen tantos sistemas diferentes como recursos tecnológicos. Algunos sistemas a base de transistores; otros con sistema Hall y algunos más que utilizan un reluctor, todos realizan, a un nivel de alta tecnología, lo que el sistema mecánico de platino desempeñó durante muchos años para lograr el mismo objetivo.

Sobre estas líneas se encuentra un esquema muy simplificado de un sistema de encendido electrónico donde la Unidad de Control se encarga de abrir y cerrar el circuito primario, con base en la información que le llega de los sensores indicándole las condiciones de funcionamiento del motor. (22)

2.4.2. Generación de rayos X

El sistema de funcionamiento de un generador de rayos X tiene un funcionamiento relativamente básico. El equipo recibe electricidad que puede ser de 220V a 440V,

2. MARCO TEÓRICO

incidente en un transformador de baja tensión que es reductor y que baje el voltaje a 5 o 10 v, lo cual va a producir incandescencia del filamento, generando liberación de electrones. Estos electrones son centralizados por la copa centralizadora de Molibdeno, y que se quedan ahí, en el filamento de tungsteno, esperando.

Cuando el equipo se dispara, con el cronorruptor, se activa el circuito de alta tensión que tiene un transformador amplificador, lo que genera un aumento de voltaje a 70 KV. Al ser tan grande la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo va a generar una diferencia de potencial y los electrones salen disparados al ánodo. Los electrones se dirigen al ánodo y chocan contra una barra de tungsteno. Cuando se activa el circuito de baja tensión, no se liberan los electrones; quedan en el filamento de tungsteno.

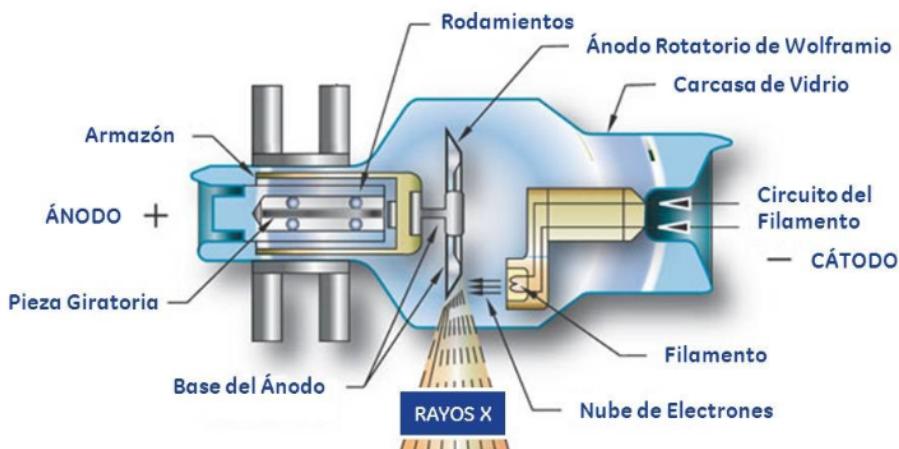


Figura 2.13: Tubo de rayos x (24)

Las aplicaciones de estos tubos de rayos x son bastas y han sido un gran avance tecnológico para la humanidad. La generación de rayos x mediante voltaje tiene sus pros y sus contras respecto a generación de rayos x por isotopos radiactivos, ya que los tubos de rayos x pueden ser apagados cuando el equipo no está operando, en cambio el isótopo radiactivo estará permanentemente irradiando, per-

diendo intensidad con el pasar del tiempo.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se expone todo el desarrollo de la fuente de alto voltaje en cuestión; diseño del sistema, fabricación del sistema, diseño del firmware del micro controlador, implementación y por último el método experimental.

El sistema esta compuesto por dos partes, hardware y firmware, el hardware se compone de tres partes como vemos en la figura 3.5: parte digital de control, inversor de voltaje y rectificador multiplicador.

Por otro lado el firmware consiste en los programas que realizan el control completo de la generación de alto voltaje por medio del desarrollo de un ambiente gráfico al que el usuario tiene acceso, control para la medición de voltajes, corrientes y protecciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema en general, así como un control para el inversor de voltaje, mediante la implementación de un ADC (Analog to Digital Converter) a la salida de una devanado de baja en el transformador de alto voltaje el cual controla la salida de alto voltaje.

3.1. Materiales utilizados

La medición y comprobación del alto voltaje no es tan sencilla si no se tienen las herramientas necesarias para ello. La utilización de oscilloscopios (figura 3.3), voltímetros (figura 3.2) y sistemas de medición se ve afectado debido a que en su mayoría los voltajes soportados por los equipos son apenas de unos cuantos miles de volts. Es por ello que en este proyecto se han requerido herramientas como lo son las sondas divisoras de voltaje, similar a la que se aprecia en la figura 3.1, permitiendo así la utilización de las herramientas antes comentadas aquí.

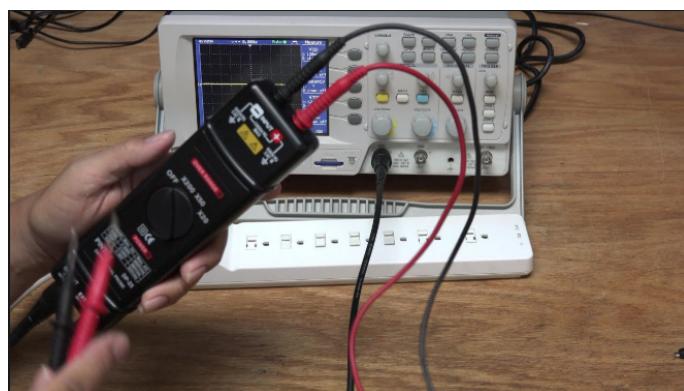


Figura 3.1: Sonda de alto voltaje

Con esta herramienta se ha logrado utilizar el oscilloscopio con una resolución de 8 bits, de la marca TELEDYNE modelo WaveSurfer y analizar la señal para presentar resultados mas claros. Podemos observar el oscilloscopio utilizado para las mediciones y un multímetro de la marca fluke, los cuales son suficientes para determinar la eficiencia de nuestra fuente de voltaje. Teniendo en cuenta siempre la seguridad requerida para la operación de estos instrumentos.



Figura 3.2: Multimetro Fluke 116 0.001V de resolución.



Figura 3.3: Osciloscopio teledyne lecroy 8 bits de resolución.

Para la fabricación de los PCB se utilizó una herramienta LPKF, router computarizado. El cual, una vez hecho el diseño en el programa EAGLE se prosiguió a la generación de los archivos gerber para su posterior maquinación.

3. METODOLOGÍA

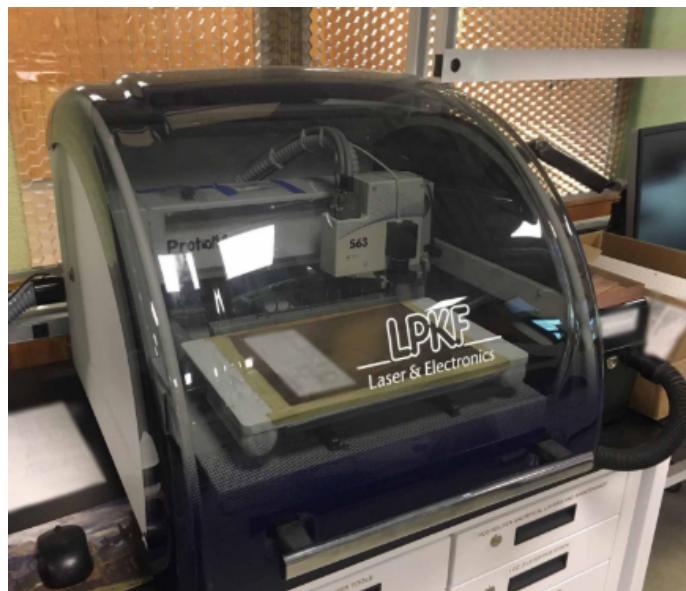


Figura 3.4: Router CNC LPKF para maquinado de PCBs.

3.2. Diseño del hardware

La figura 3.5 muestra un diagrama a bloques de la estructura general del hardware que conforma el sistema de generación de alto voltaje, el cual esta compuesto, desde la parte superior a la inferior, primeramente por bloques relacionados con el control digital del sistema, este bloque se encarga de las interfaces para el usuario así como también del control e instrumentación de los diferentes sensores, el siguiente conjunto de bloques representan la electrónica encargada de la inversión de voltaje y por ultimo tenemos la rectificación.

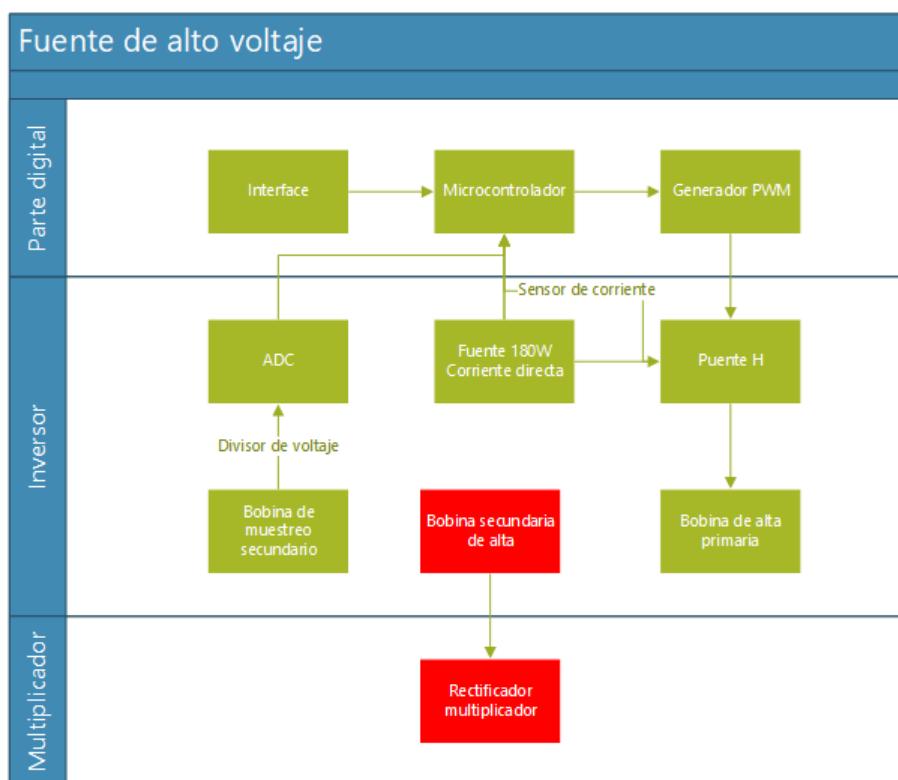


Figura 3.5: Topología de fuente de alto voltaje

3. METODOLOGÍA

3.2.1. Hardware de interface

Para el desarrollo de la interface gráfica se a utilizado un microcontrolador AT-MEGA2560, implementado por la facilidad de programación y los tiempos cortos para la conclusión de este proyecto, así como también la implementación de una pantalla TFT-LCD (Pantalla de cristal líquido de transistores de película fina) y comunicación UART como interfaces gráfica al usuario. Se ha utilizado el hardware de dicha placa y ahorrado tiempo de desarrollo.

3.2.2. Hardware de fuente de voltaje a 180w

Esta sección consiste en varias etapas de desarrollo, para ello primero se ha desarrollado una fuente de voltaje de 180W, que es el primer circuito a analizar. Podemos observar en la figura 3.6 el diseño propuesto. El cual esta conformado por el regulador de voltaje LM723 realizando el arreglo fuente de voltaje por modalidad de regulación positiva, diseño básico propuesto en el datasheet de dicho integrado. Este arreglo no es suficiente para obtener los 180W que buscamos, es por ello que se eligió una configuración a la salida del integrado en modo seguidor de voltaje y amplificador de corriente, como podemos ver en la figura 3.7.

3. METODOLOGÍA

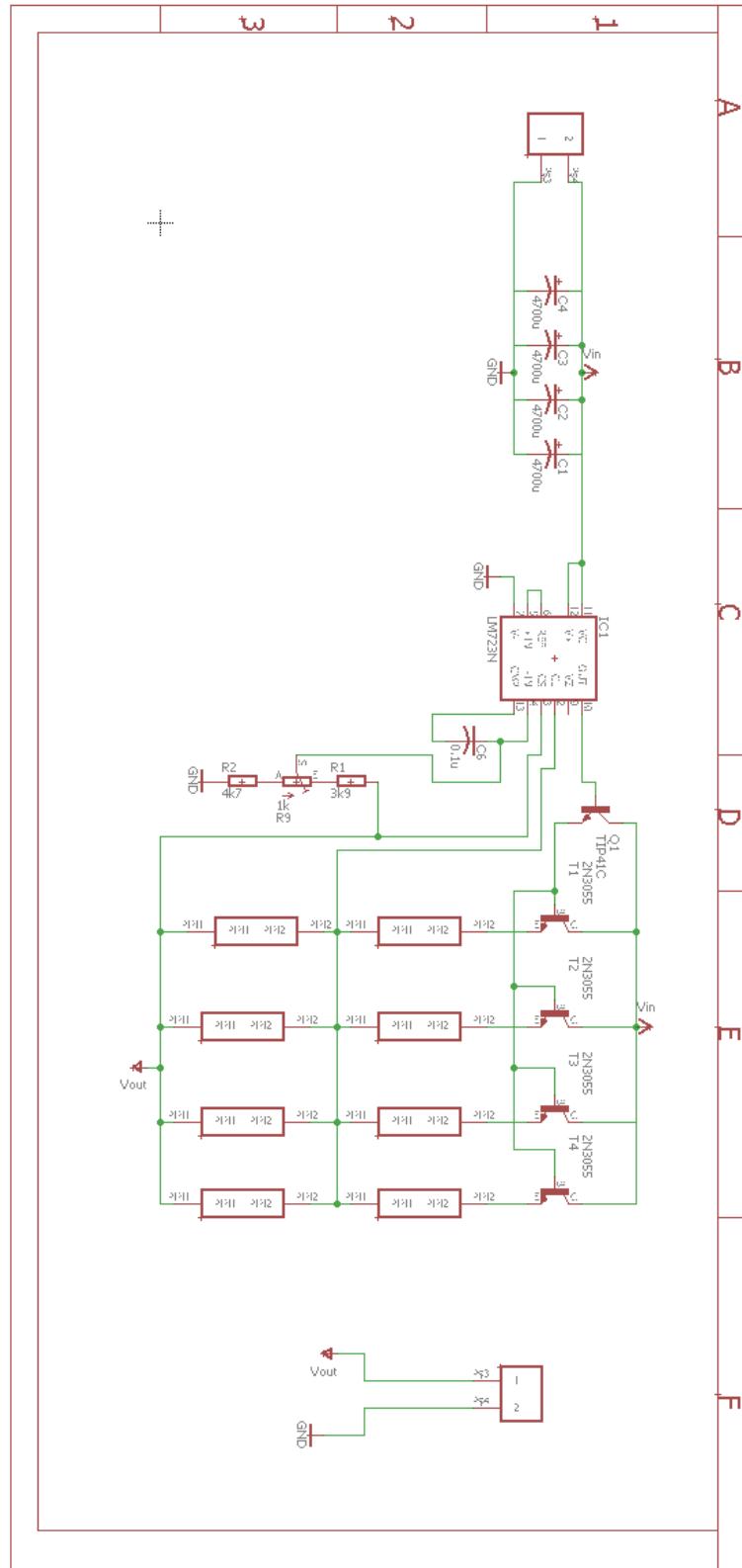


Figura 3.6: Diseño esquemático de fuente 180w

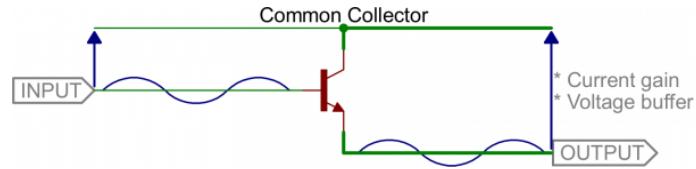


Figura 3.7: Seguidor de voltaje transistor NPN

El colector común no amplifica ningún voltaje (de hecho, el voltaje de salida será 0.6V más bajo que el voltaje de entrada). Por esta razón, el circuito es llamado a veces como seguidor de voltaje.

Este circuito tiene gran potencial como amplificador de corriente. Además de esto, la alta ganancia de corriente combinada con la ganancia de voltaje cercano a uno hace que este circuito sea un buen búfer de voltaje. Un búfer de voltaje previene que un circuito de carga interfiera de forma indeseable con el circuito que lo está conduciendo.(21)

La amplificación de voltaje de un solo transistor no es suficiente para llegar a los 15 A, es por ello que se ha optado por la construcción de un arreglo del tipo Darlington, con los transistores 2n3055. La salida de voltaje es casi la misma que el voltaje de entrada (menos 1.2V-1.4V), pero la ganancia de corriente es el producto de dos ganancias de transistores. Podemos ver el arreglo en la figura 3.7. De esta manera podemos hacer una regulación de voltaje con el integrado LM723 y tener una amplificación de corriente a la salida de nuestra etapa de potencia.

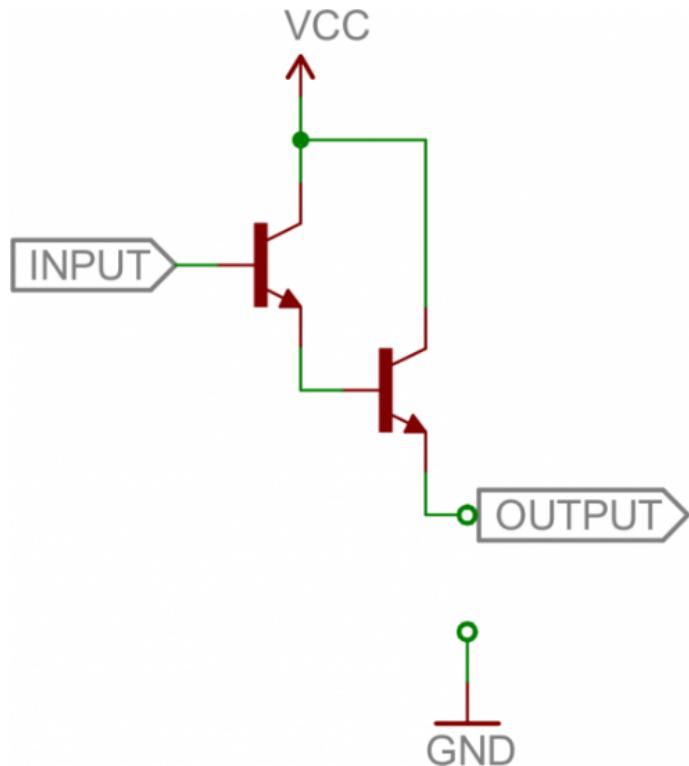


Figura 3.8: Arreglo Darlington de transistores NPN

El potenciómetro R9 en la figura 3.6 regula la salida de voltaje, R1 y R2 limitan dicha regulación mediante la ecuación 3.1. Los transistores Q1, T1, T2, T3 y T4 están configurados en modo darlington aumentando la corriente que puede pasar a la salida del regulador LM723. Los transistores de T1 a T4 soportan cargas mayores a los 5 Amp. Las resistencias de poder ayudan a compartir la corriente que pasa por la rama de cada transistor.

Podemos ver que cuando tenemos una corriente de 15 Amp. con resistencias de 0.1Ω tenemos una potencia de 18W que se va a disipar en las resistencias de potencia de 5W cada una, los cuales se ven distribuidos entre las 4 ramas de cada transistor.

Podemos tener una ecuación del comportamiento de nuestra regulación de voltaje

mediante la ecuación 3.1:

$$V_{out} = V_{ref} X \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (3.1)$$

Se ha simulado esta fuente de voltaje en el programa LTSPICE como se muestra en la figura 3.9, en este punto se busca el menor rizo posible en nuestra salida final, ya que, en este punto el ruido sera amplificado cientos de veces. Podemos observar en la figura 3.10 que nuestra simulación se acerca bastante a lo buscado, una señal de 12v en corriente directa, teniendo una señal estabilizada en un tiempo de 24ms, suficientemente pequeño para la inicialización de nuestro proyecto. El diseño del PCB se encuentra en la figura 3.11, el cual fue diseñado en el programa EAGLE.

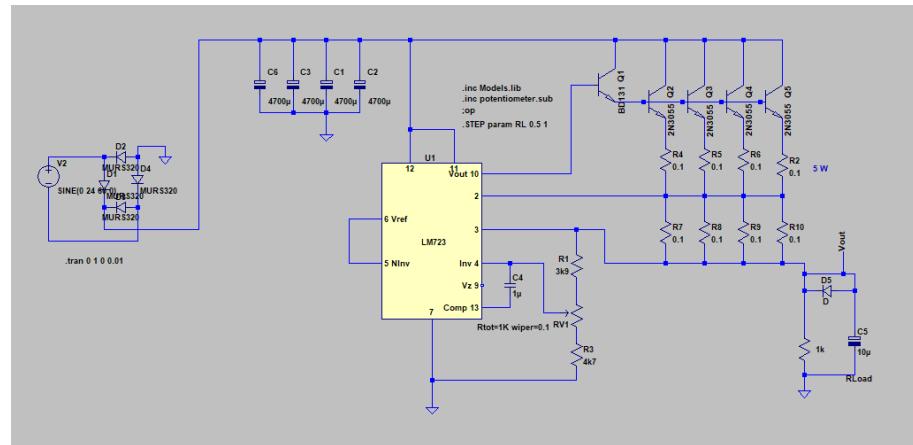


Figura 3.9: Simulación en LTSPICE fuente 180w

3. METODOLOGÍA

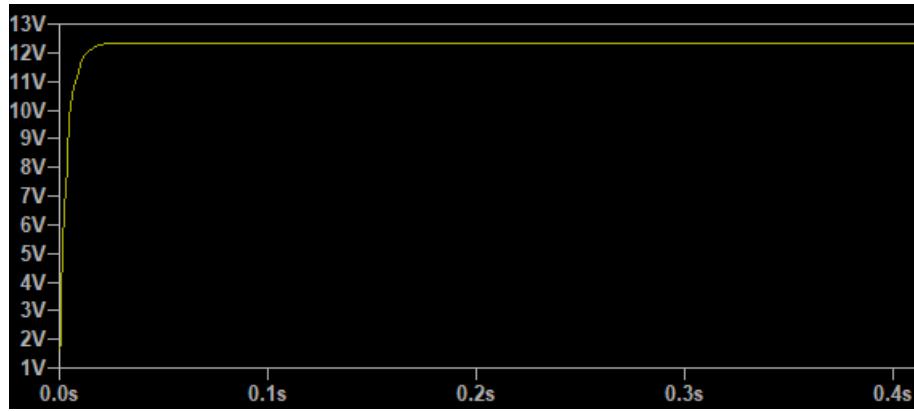


Figura 3.10: Simulación fuente regulable en LTSPICE

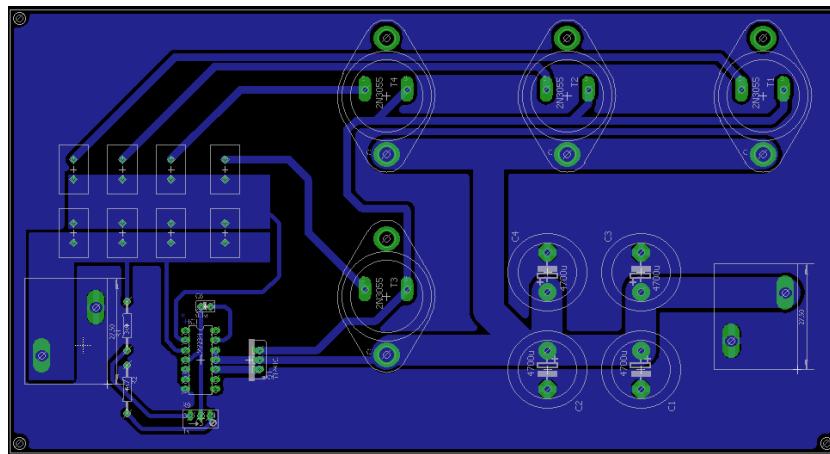


Figura 3.11: Diseño placa de fuente de regulable de 180w

3.2.3. Hardware inversor

Para el inversor se ha implementado una topología del tipo puente H, ya que es una de las mas utilizadas por los desarrolladores. El integrado BTS7960B (26), de la empresa Infineon, es un mosfet de potencia bastante robusto y con una comunidad de desarrollo bastante grande, es por ello que se ha seleccionado este modelo entre los miles que existen en el mercado. Podemos observar el diagrama implementado en el apendice A.2 (25) y partiendo de él se ha utilizado la placa de desarrollo IBT2 (figura 3.13) por cuestión de costos.

El integrado BTS7960 es un semipuente H, el cual esta diseñado para trabajar con cargas inductivas de alta potencia. Como PWM, el integrado puede soportar velocidades de conmutación de hasta 25 KHz, 43 Amperes y una protección a temperaturas altas. Podemos ver un diagrama a bloques del integrado.

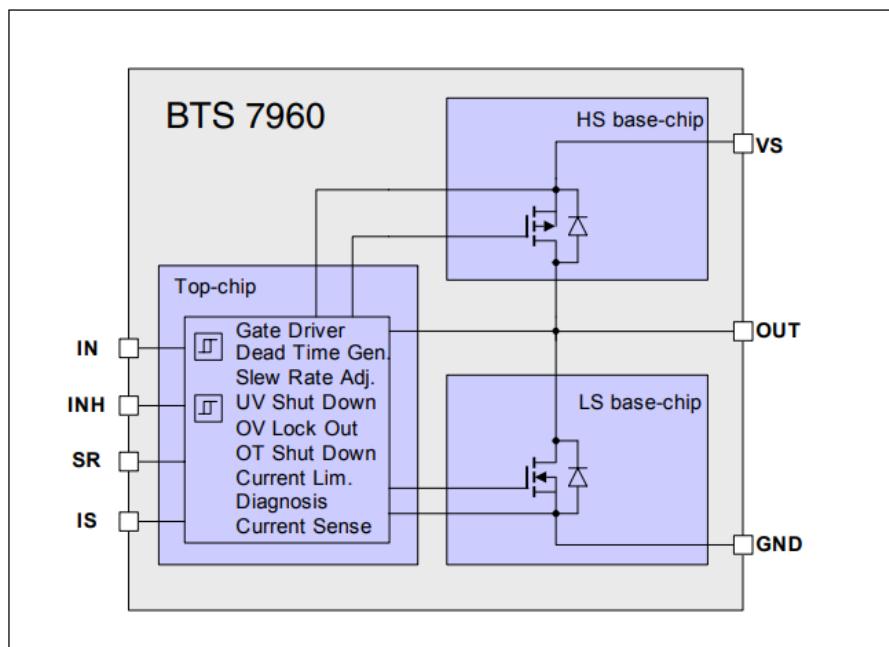


Figura 3.12: Placa de desarrollo, puente H IBT-2(23)

El control de la placa IBT-2 es bastante sencillo, esta diseñada para procesos de

3. METODOLOGÍA

automatización de motores. Este semi-puente H se alimenta con hasta 43 V y para el integrado de control SON 5 V. Se controla mediante los pines R-EN y L-EN, dichos pines son encargados del giro en el caso del motor. También tenemos R-PWM y L-PWM aquí pasamos de un PWM de baja potencia a alta potencia por los pines con la letra M. Podemos apreciar de mejor manera el control de dicha placa en el manual de operación de dicha placa ([23](#))

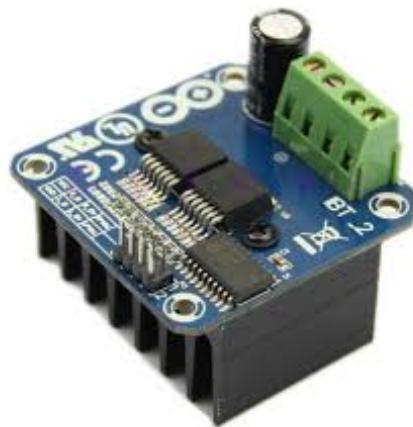


Figura 3.13: Placa de desarrollo, puente H IBT-2([23](#))

3.2.4. Multiplicador de voltaje Cockroft Walton

Mediante el motor de simulación de LTSPICE se ha realizado el diseño del multiplicador a utilizar. Contando con valores de capacitores de $0.1 \mu\text{F}$, diodos MUR4100, voltaje de entrada de 1KV y una frecuencia variable de 10KHZ. Podemos observar en la figura 3.14 el diseño planteado, con la finalidad de tener un punto de referencia al momento de realizar el experimento. Se busca tener un rizo menor al 1 % del voltaje de salida y tomaremos la simulación como punto de partida para la construcción del multiplicador.

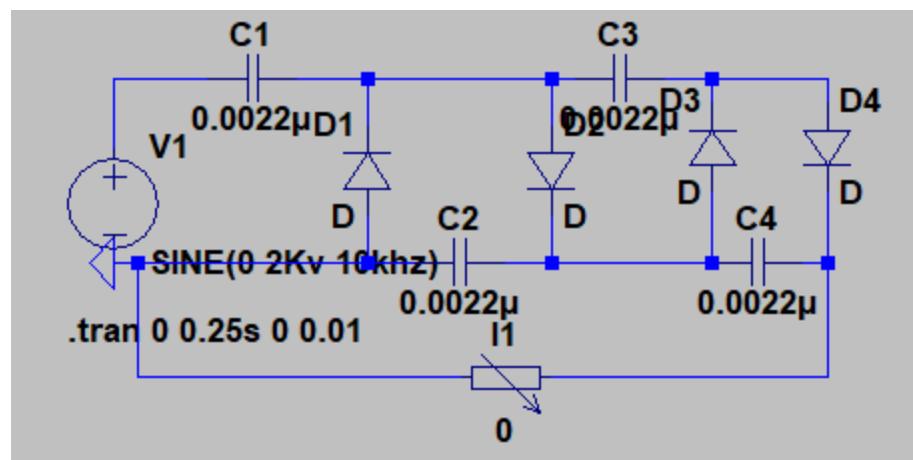


Figura 3.14: Multiplicador de voltaje 2 niveles

Se han realizado corridas en el simulador con cargas que exigen 1 mA, 10 mA y pruebas sin carga. Podemos observar en la figura 3.15 la salida de CD que se obtiene cuando no tenemos carga alguna, como vemos la salida esta aparentemente libre de rizo y este es el punto de referencia para medir la eficiencia de nuestra fuente. El voltaje en color rojo es la primera etapa de nuestro multiplicador, en color azul tenemos la segunda etapa y en color verde la entrada de corriente alterna.

3. METODOLOGÍA

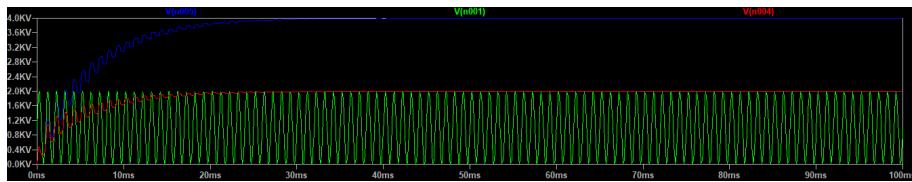


Figura 3.15: Multiplicador de voltaje sin carga

Para una carga con una exigencia de 1 mA podemos observar la figura 3.16. Como vemos ahora el rizo y la caída en el voltaje es perceptible a simple vista.

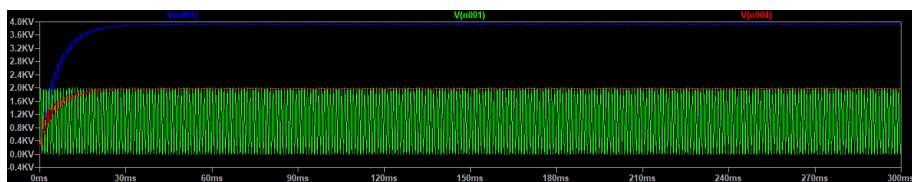


Figura 3.16: Multiplicador de voltaje con 1 mA de carga

Para una carga con una exigencia de 10 mA podemos observar la figura 3.17. Tenemos una caída de voltaje bastante significativa y un rizo bastante pronunciado.

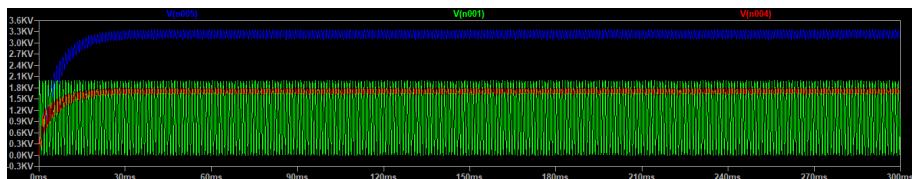


Figura 3.17: Multiplicador de voltaje con 10 mA de carga

Tenemos un voltaje $V_{1mA} = 3.9KV$, $V_{10mA} = 3.2KV$ y $V_{NL} = 4KV$ ahora utilizando la ecuación 2.7 podemos calcular la eficiencia de nuestra fuente y utilizar este punto de referencia para la construcción de nuestro proyecto. Para una carga de 1 mA tenemos $VR_{1mA} = 2.5\%$ Y para una carga de 10 mA $VR_{10mA} = 20\%$ valor límite para nuestro circuito. Caidas de voltaje aceptables para nuestros propósitos.

Hasta aquí podemos capturar los siguientes datos importantes, para una carga de 1 mA tenemos una caída de voltaje de 100V y para una carga de 10 mA se tiene

una caída de 800V, estos valores son muy grandes, es por ello que se tendrán que ajustar mediante un circuito de retroalimentación. Dicha retroalimentación consiste en un sistema de lazo cerrado que mida constantemente la salida, la compare con el nivel de referencia deseado y según el error, realice automáticamente acciones correctivas para mantener el valor deseado.

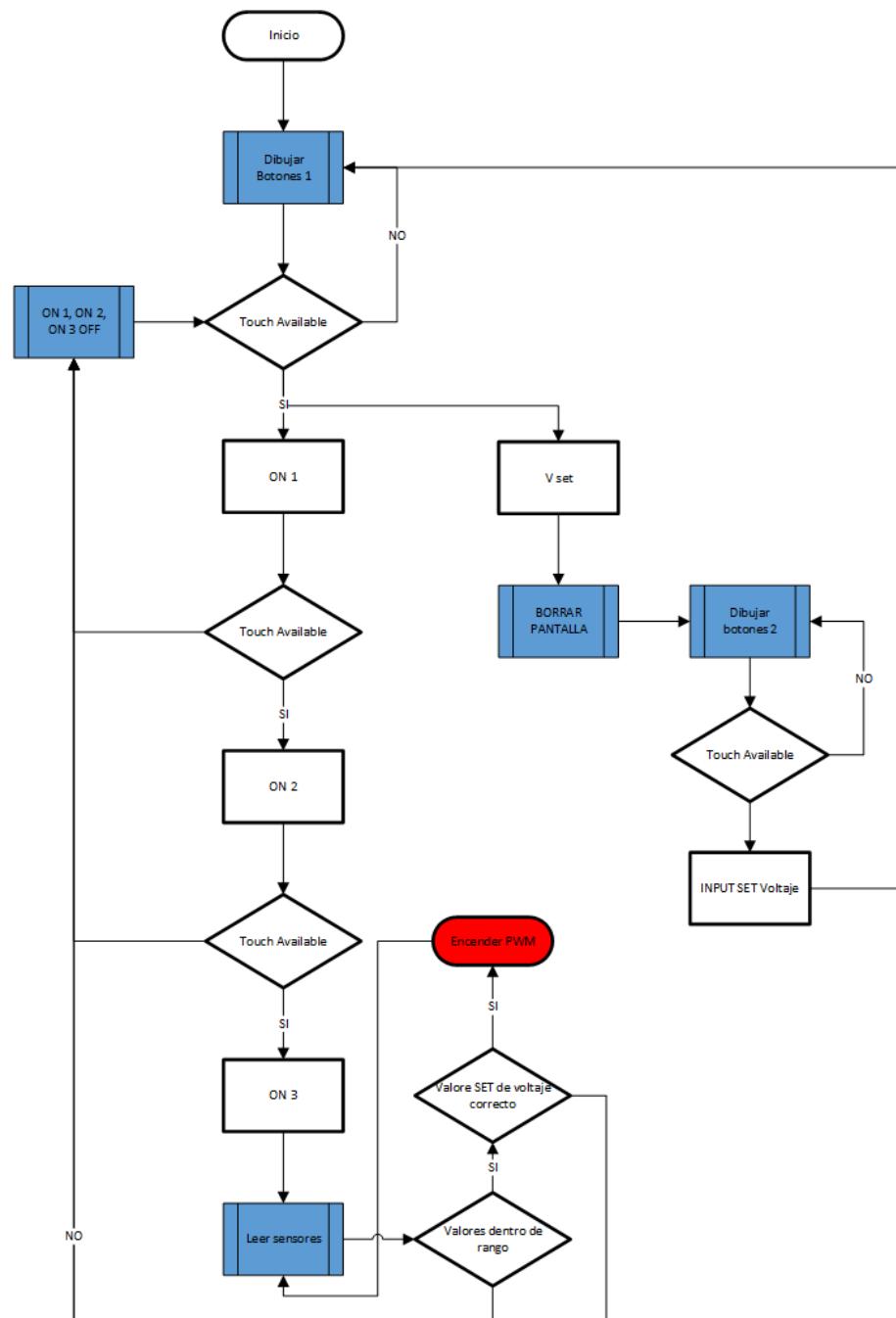
3.3. Firmware

3.3.1. Interface gráfica

Para el desarrollo de la interface gráfica se ha realizado en el ambiente de programación de Arduino, intentando la utilización de la menor cantidad de librerías de autoría no propia y siguiendo algunas reglas de programación básicas para microcontroladores como lo es la no utilización de los comando delay. Dicho código se divide en varias secciones, para el cual solo se utilizaron las siguientes librerías:

```
#include <UTFT.h>
#include <URTouch.h>
```

En la siguiente figura podemos observar la topología del firmware que se ha desarrollado.

**Figura 3.18:** Multiplicador de voltaje con 10 mA de carga

El microcontrolador cuenta con múltiples salidas que permiten una comunicación con el Hardware desarrollado, se han definido las siguientes variables, salidas y

3. METODOLOGÍA

entradas del microcontrolador.

```
void setup(){

    myLCD.InitLCD();
    myLCD.clrScr();
    myTouch.InitTouch();
    myTouch.setPrecision(PREC_HI);
    Serial.begin(9600);
    Serial.setTimeout(50);
}

//Definimos fuentes que utilizaremos
extern uint8_t SmallFont[];
extern uint8_t BigFont[];
extern uint8_t SevenSegNumFont[];

//variables que estaremos utilizando
int x,y,pantalla=1,k,voltaje=1,p=0,p1=0,p2=0,p3=0,vout=0;
char dato[20];

//variables para tomar datos de UART

String str = "";
const char separator = ',',';
const int dataLength = 2;
int data[dataLength];
char vin[20];
```

```
char current[20] ;
```

Como vemos se ha utilizado la función setTimeout, configuración de la comunicación serial, necesaria en el proyecto para mantener una medición de datos sin riesgos a pérdida de información debido a los subprocessos que se realizan dentro del firmware diseñado. SetTimeout() establece los milisegundos máximos para esperar los datos de transmisión, por defecto es de 1000 milisegundos. Esta función es parte de la clase Stream y es llamada por cualquier clase que hereda de ella (Wire, Serial, etc.) (27).

Todo el código esta dividido en funciones, las cuales llamamos en nuestro LOOP, tratando siempre de cumplir con las siguientes características: no utilización de la función delay, no utilización de ciclos que dependa de alguna condición externa, utilizar el menor código posible para una acción. Podemos observar el resultado de nuestro desarrollo en las imágenes 3.19 y 3.20.

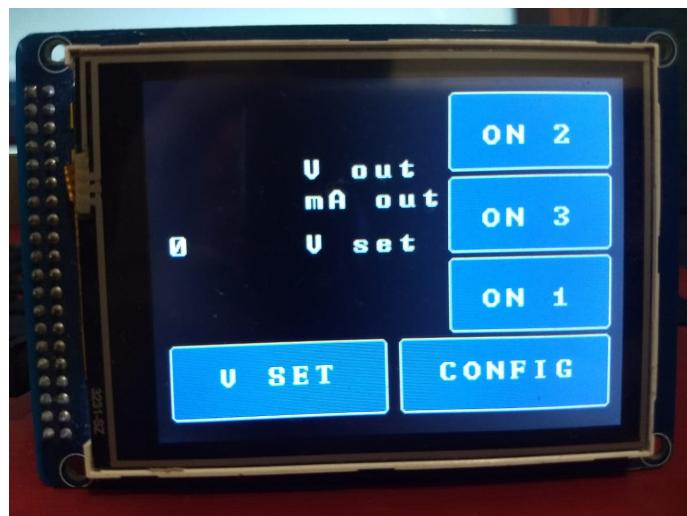


Figura 3.19: Pantalla 1



Figura 3.20: Pantalla 2

Una vez que definimos las funciones a utilizar para estas dos primeras pantallas proseguimos a las funciones de cálculos y procesamiento de datos. Para ello hemos creado una función capaz de configurar el voltaje de salida, manteniendo una comunicación UART hacia un microcontrolador.

Una segunda función es la encargada de recibir los datos procedentes del segundo microcontrolador, encargado de leer los datos de sensores y preparar el funcionamiento del inversor.

Mediante las funciones anteriores podemos mantener una comunicación INPUT y OUTPUT mediante UART, con el segundo microcontrolador, y mantener un senseo de las variables necesarias para el correcto funcionamiento de la fuente de alto voltaje.

3.4. Implementación del Hardware

Una vez obtenido el diseño de todas las etapas, así como también la programación del firmware se prosigue a la fabricación de los PCB de la fuente de corriente

directa a 180W, el acondicionamiento de la parte digital a la etapa de potencia. Se aisló mediante una caja que solo da acceso al usuario a la parte de salidas y entradas como vemos en la imagen 3.21 Evitando así riesgos al usuario.

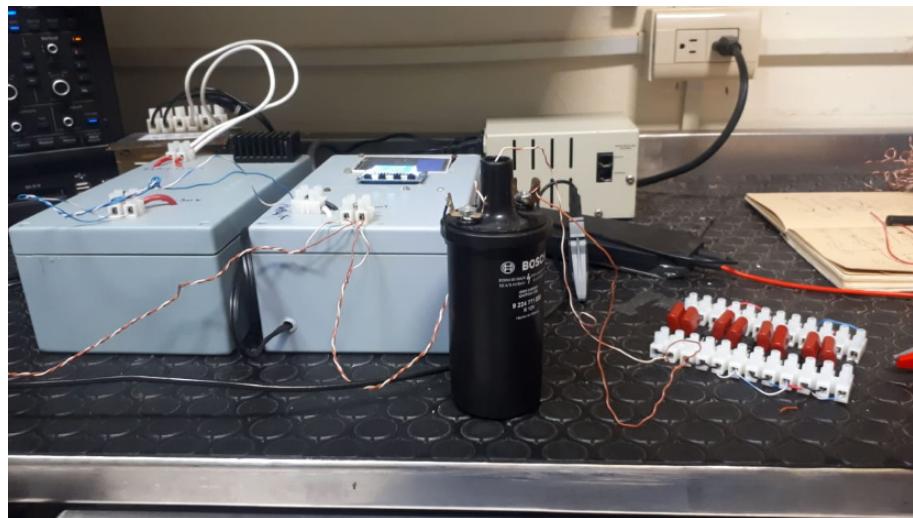


Figura 3.21: Foto del sistema en general

Una vez terminado el Hardware se hicieron pruebas de cada módulo desarrollado, con la finalidad de indicar las condiciones óptimas para el sistema en general, haciendo pruebas con diferentes cargas y observando el ruido obtenido de ellos.

3.4.1. Fuente de 180W

Se ha terminado maquinar la fuente de voltaje en el router LPKF y realizado el ensamblaje. Se tienen 180 W que pueden ser peligrosos si no se tiene el cuidado necesario, es por ello que se ha optado por aislar el circuito y dejar solamente las salidas y entradas necesarias como podemos ver en la imagen 3.22.

3. METODOLOGÍA



Figura 3.22: Multiplicador de voltaje sin carga

Se ha optado por hacer pruebas a 12V y cargas de 7.5 OHMS, 15 OHMS y una prueba sin carga, esperando obtener el menor ruido posible. Mediante estos resultados se ha creado una gráfica gaussiana para determinar el voltaje RMS en cada experimento. Para ello se implemento el siguiente código desarrollado en "ROOT CERN":

```
#include "Riostream.h"
#include "TH1.h"
#include "TMath.h"
```

```
#include "TF1.h"
#include "TLegend.h"
#include "TCanvas.h"
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <cstdlib>

void clase() {
    ifstream in; ofstream outfile;
    int i,j;
    int z,suma=0;

    float n,time;
    double x,y,xx,yy;
    TH1 *histo1 = new TH1F("Arrival distribution","", 50, 11.8,12.4);

    in.open("C1600v-4M00001.txt");

    while (1) {
        if (!in.good()) break;
        in >> x;

        histo1->SetFillColor(4);
        histo1->Fill(x);
    }
}
```

3. METODOLOGÍA

```
in.close();  
  
histo1->Draw();  
}
```

Se han obtenido como resultado las siguientes distribuciones:

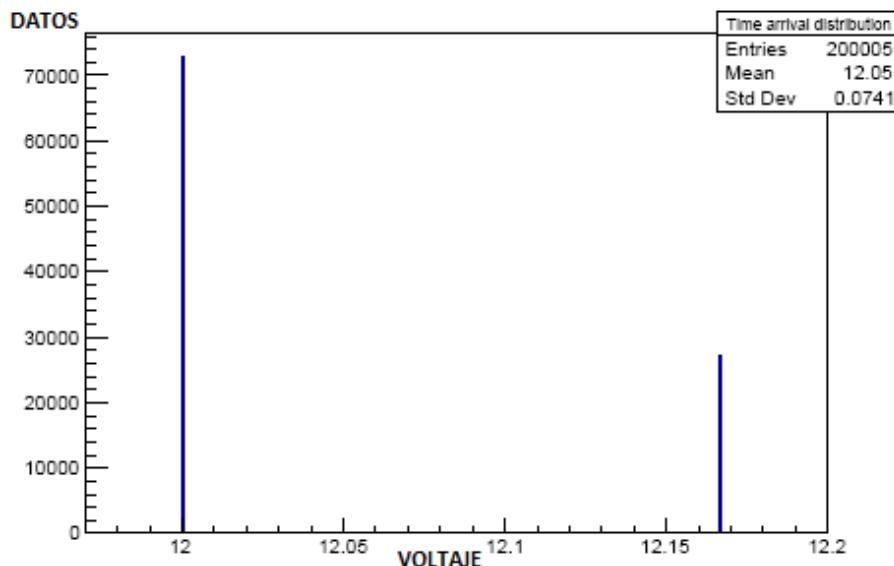


Figura 3.23: Fuente 12V sin carga con error de 0.076V

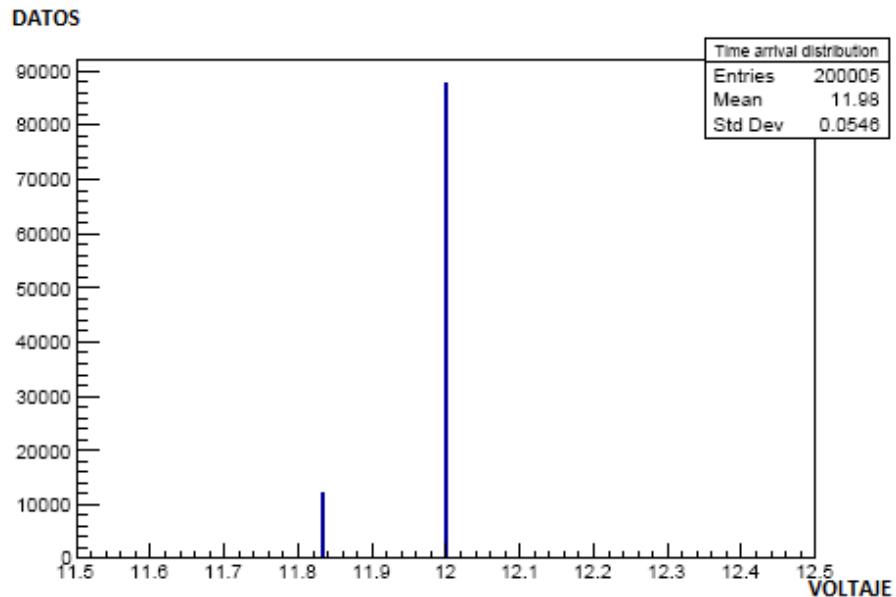


Figura 3.24: Fuente 12V con carga a 7.5 OHMS con error de 0.076V

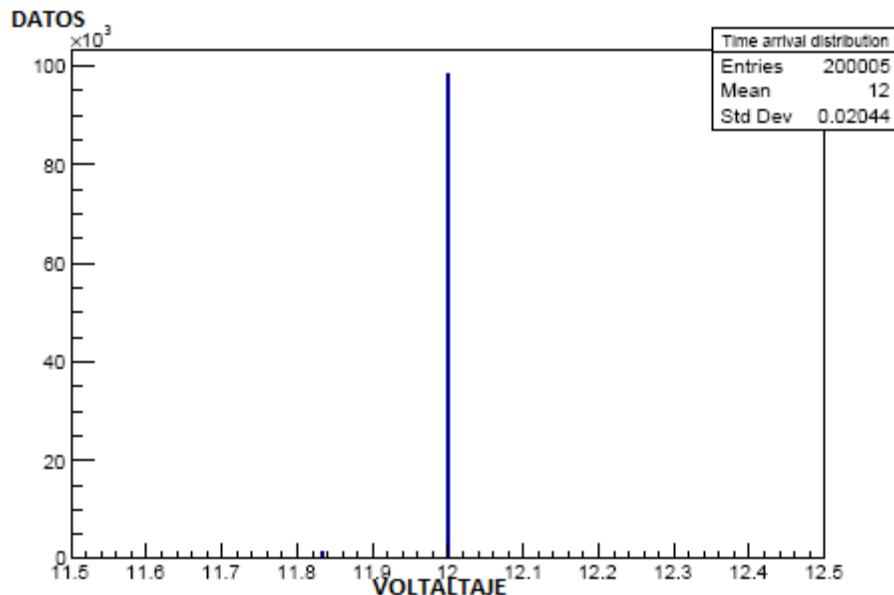


Figura 3.25: Fuente 12V con carga a 15 OHMS con error de 0.076V

Como observamos nuestro RMS se mantiene desde 0.0471v sin carga a 0.0546V con una carga de 7.5 ohms o 90w, con un error asociado a el de 0.076V, ya que nuestro osciloscopio es de 8 bits, obteniendo una regulación de voltaje de

3. METODOLOGÍA

$\%VR = 0.0627\%$ que significa una eficiencia del 99.93 % cuando la fuente es sometida a una carga resistiva de 90w, eficiencia bastante buena para los experimentos siguientes.

Utilizando la ecuación 2.6 obtenemos los siguientes resultados en rizo:

Para 12V sin carga:

$$r = \frac{0.0741}{12.05V} \times 100 = 0.61\%$$

Para 12V con carga de 7.5 ohms:

$$r = \frac{0.0546V}{11.98V} \times 100 = 0.45\%$$

Para 12V con carga de 15 ohms:

$$r = \frac{0.02044V}{12V} \times 100 = 0.170\%$$

3.4.2. Inversor de voltaje

Este modulo ha sido aislado de la misma manera que se aisló la fuente de 180W (Fig. 3.21), debido a los riesgos que conlleva al usuario si no se tiene el cuidado pertinente. Ahora, utilizando la fuente de 180W y corriente directa se alimenta nuestro inversor. Nuestro inversor tiene dos variables que pueden ajustarse de manera manual o automática; la frecuencia y el ciclo de trabajo. Mediante estas variables, incidentes en nuestro primario de la bobina, podemos variar la salida del embobinado de alto voltaje y tener un ajuste fino de unos cuantos volts por paso.

Tener cargas inductivas muchas veces puede volver mas complicado la implementación de nuestros circuitos, agregando armónicos y corrientes que pueden comportarse de manera no esperada. Podemos observar en la figura 3.27 la salida de nuestro inversor agregando una carga inductiva, un ciclo de trabajo del 5 %

y una frecuencia de 5 KHz. Podemos observar que nuestra señal AC mantiene su forma.



Figura 3.26: Implementacion experimento inversor.

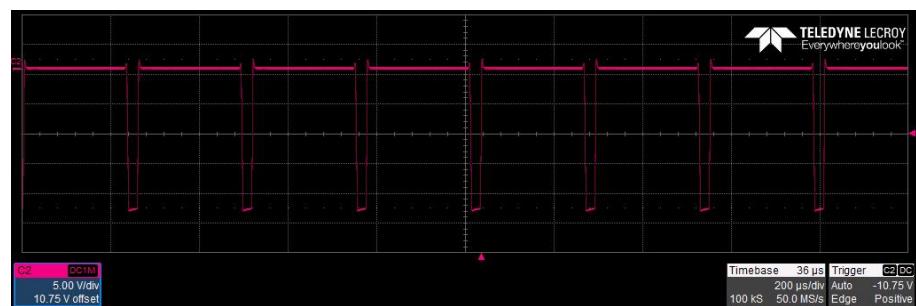


Figura 3.27: Implementación inversor salida con carga inductiva.

3.4.3. Multiplicador de voltaje

Existen aspectos claves para este apartado que definirán la calidad de nuestra salida, es por ello que se han realizado pruebas variando algunos aspectos como lo son la frecuencia y el ciclo de trabajo incidente en la bobina primaria del transformador de alto voltaje. Podemos observar un circuito provisional desarrollado (figura 3.28) y mediante mediciones se han obtenido principalmente dos valores, el voltaje medio y el voltaje RMS, para obtener el rizo sobre dicha señal.



Figura 3.28: Implementación inversor

Podemos ver en la figura 3.29 el arreglo que se desarrollo para tomar las mediciones con el osciloscopio. Se tomaron cien mil mediciones por corrida, y a partir de ellas se creo el histograma.

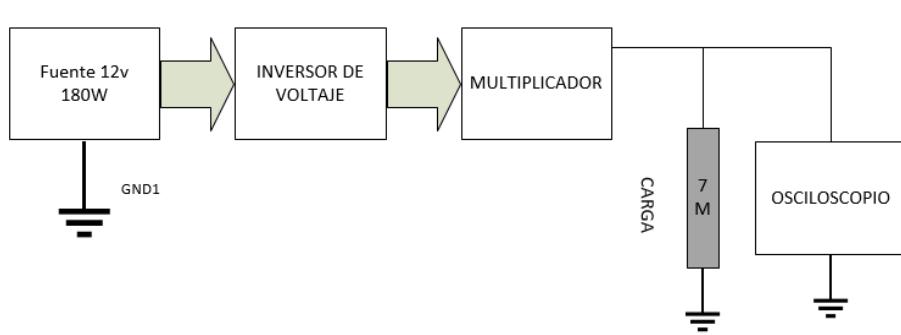


Figura 3.29: Implementación inversor

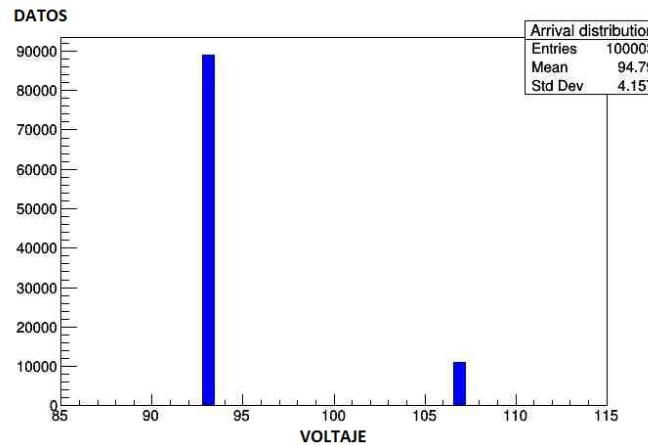


Figura 3.30: Medición sin carga a 93v con un error de 0.36V

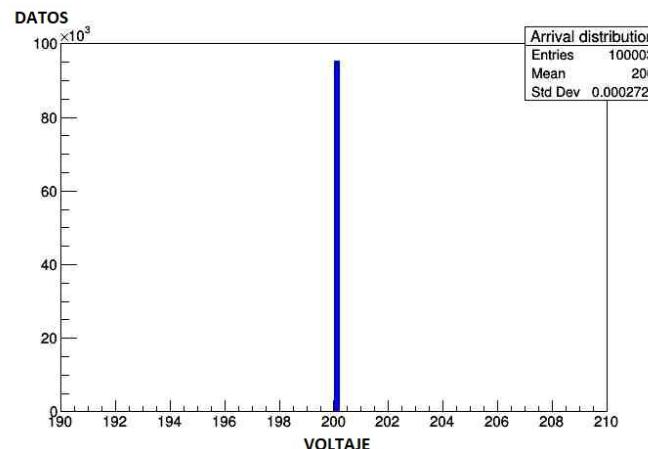


Figura 3.31: Medición sin carga a 200V con un error de 0.78V

3. METODOLOGÍA

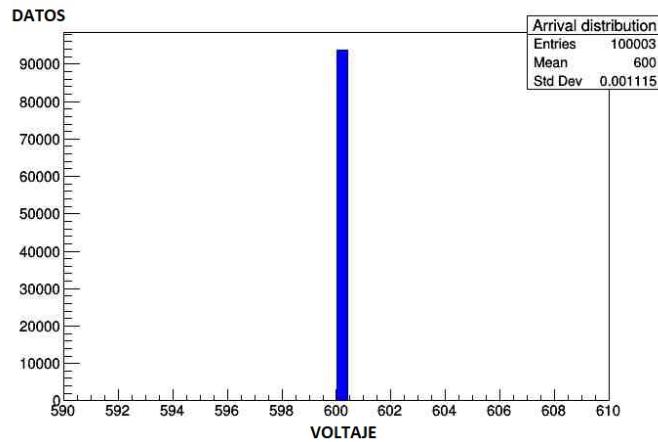


Figura 3.32: Medición sin carga a 600V con un error de 2.34V

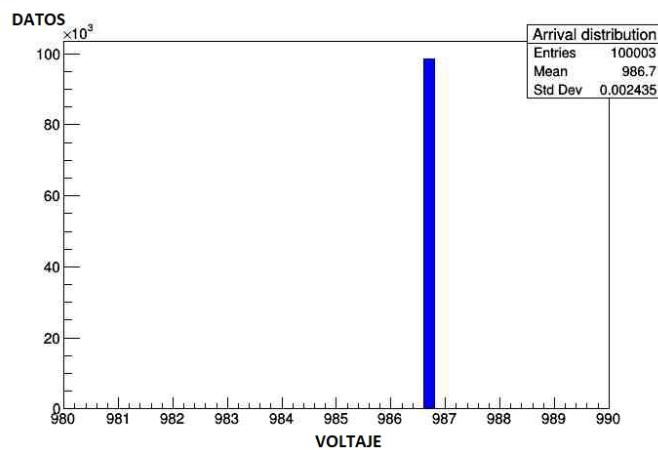


Figura 3.33: Medición sin carga a 986V con un error de 3.85V

A partir de estas mediciones podemos calcular el rizo que tiene nuestra medición utilizando la ecuación 2.4 como podemos observar en las figuras 3.30, 3.31, 3.32 y 3.31 respectivamente.

Para la medición a 93V tenemos:

$$r = \frac{4.157V}{94.79V} \times 100 = 4.3\%$$

Para $200V$:

$$r = \frac{0.00027V}{200V} X 100 = 135\mu\%$$

Para $600v$:

$$r = \frac{0.001115V}{600V} X 100 = 185\mu\%$$

Para $1000V$

$$r = \frac{0.002435V}{986V} X 100 = 246.7\mu\%$$

El segundo experimento que se realizó fue agregar una carga de $4M\Omega$ para obtener la eficiencia de la misma, valor calculado con la ecuación 2.7.

Para $93V$ $V_{NL} = 186V$ y $V_{FL} = 100V$:

$$\%VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} = \frac{186V - 100V}{186V} X 100 = 86\%$$

Para $300V$ $V_{NL} = 577V$ y $V_{FL} = 300V$:

$$\%VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} X 100 = \frac{577V - 300V}{300V} X 100 = 92\%$$

Los valores importantes para definir la eficiencia de una fuente son el rizo que existe sobre el voltaje de corriente directa y la caída de voltaje con una carga respectiva. En nuestro caso se tienen caídas de voltaje de hasta el 92 %, debido a que no se cuenta con una retroalimentación necesaria.

Capítulo 4

Análisis de Resultados

4.1. Resultados

Se ha logrado mediante la implementación de un sistema de inversor de voltaje alcanzar voltajes de hasta 3.8 KV a una potencia de 20w, voltaje controlado digitalmente por un computador o de manera manual mediante una interface digital. Se ha desarrollado un código en root CERN para encontrar el voltaje RMS de nuestro voltaje de salida. Nuestras mediciones realizadas arrojaron las distribuciones de las figuras 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31 para diferentes voltajes sin carga.

Como observamos se han obtenido voltajes sin perturbaciones y con relativo bajo rizo asociado a él, menor al 1 %. Se realizaron cien mil mediciones por cada distribución y a partir de ella podemos observar un voltaje RMS de 4.3V a 93V, este presenta el mayor rizo, ya que nuestro transformador esta diseñado para manejar altos voltajes, 0.00027V para 200V, 0.0011V para 600V y 0.0024V para 986V respectivamente.

Se observa en la tabla los siguientes resultados de nuestras mediciones con sus variables correspondientes, siendo bastante obvio que nuestro osciloscopio no logro obtener de manera adecuada las variaciones en voltaje que necesitamos para

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

nuestro análisis.

Voltaje	Frecuencia	Dutty (%)	Rizo (%)
93	4.4 KHz	4	0.043 ± 0.38
200	4.05 KHz	4	$135\mu \pm 0.78$
600	4.68 KHz	6	$185\mu \pm 2.34$
986	3.14 KHz	7	$246.7\mu \pm 3.85$

4.1.1. Análisis espectral

Una de las pruebas realizadas a la fuente de alto voltaje para caracterizar su comportamiento fue realizar un análisis de frecuencias. Para esto configuro el PWM a 8KHz y un ciclo de trabajo del 8 %, consiguiendo así un voltaje de salida de 300V, para medir de forma segura utilizamos un divisor de voltaje y reducimos el voltaje a 40V. En la figura 3.34 se observa la señal de CD en la parte superior y en la parte inferior el espectro de frecuencias obtenidos, observamos un pico predominante en 0Hz y una serie de picos en frecuencias múltiplos de 8KHz, es decir, la señal cuadra del inversor pasa a través del arreglo de diodos y capacitores del multiplicador del voltaje.

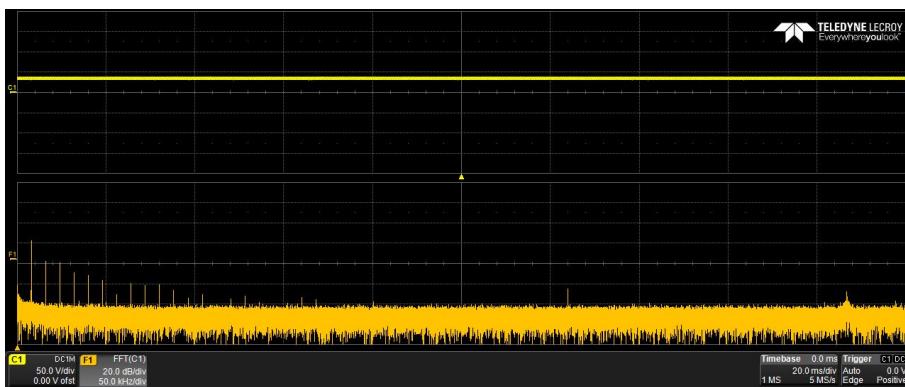


Figura 4.1: Medición sin carga a 986V con un error de 3.85V

Es importante mencionar que se hicieron pruebas a bajo voltaje para sacar provecho de los 8 bits de resolución del osciloscopio, cuando subimos el voltaje alrededor de 1kV o 1.5kV (recordemos que el osciloscopio soporta 400Vp de entrada,

extendidos a 1.5kV utilizando la sonda del fabricante) la resolución del osciloscopio limita los cambios de voltaje que podemos detectar, en estos casos las mediciones eran muy similares a la siguiente gráfica. En la figura 3.35 observamos la señal de alto voltaje, en la figura 3.36 hacemos un acercamiento a dicha señal, aquí podemos percatarnos que la adquisición solo podía leer dos valores diferentes, es decir, debido a la resolución de nuestro instrumento de medición, solo medimos dos valores de voltaje de toda la componente de rizo de la señal.

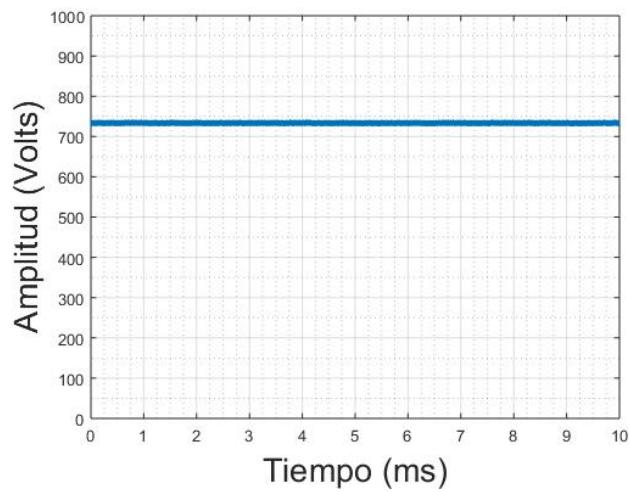


Figura 4.2: Medición de alto voltaje.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

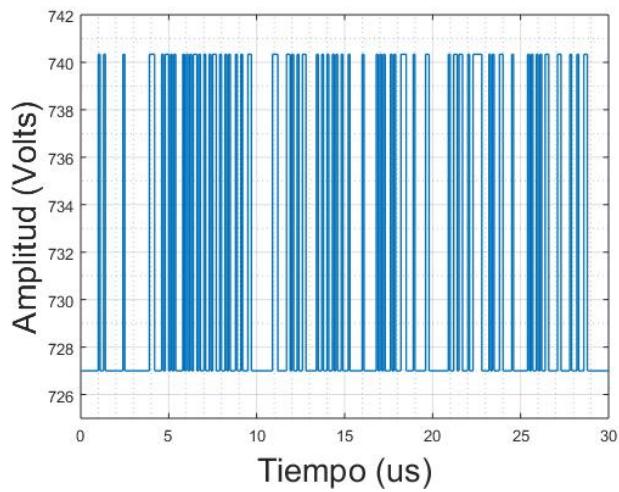


Figura 4.3: Zoom a señal de alto voltaje.

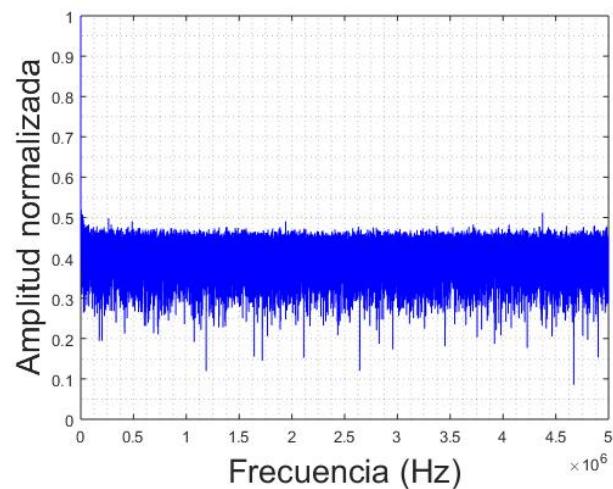


Figura 4.4: Transformada de fourier a señal de alto voltaje.

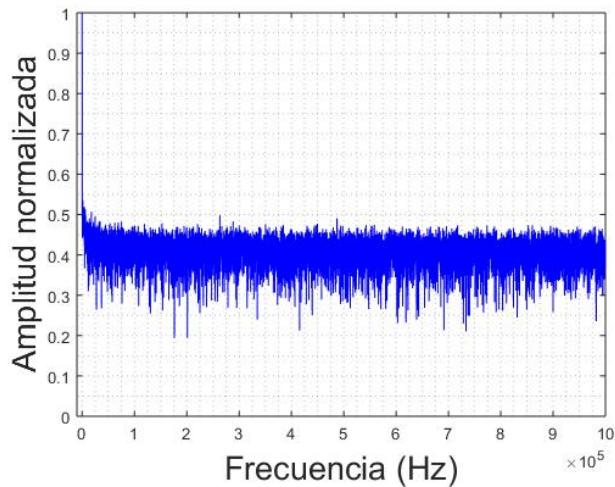


Figura 4.5: Transformada de fourier a señal de alto voltaje desplazada para observar frecuencias en 0 Hz.

En la figura 3.37 podemos observar la Transformada de Fourier de la señal de alto voltaje, se observa que no existen componentes importantes salvo en el inicio de la gráfica. En la figura 3.38 podemos observar un acercamiento a la gráfica de la Transformada de Fourier (hasta 1 MHz), como mencionamos anteriormente, solo aparece un pico en 0Hz, el correspondiente al nivel de CD.

Para lograr analizar las frecuencias de la señal de ruido apropiadamente, se realizaron mediciones utilizando un acoplamiento a capacitor (10nF) para suprimir la componente de CD y muestrear solamente la AC. En la figura 3.39 observamos la componente de alterna y en la figura 3.40 la Transformada Rápida de Fourier de dicha señal, observamos una diferencia significativa contra el análisis de la gráfica anterior. Observamos una componente fuerte en 0 Hz y otra alrededor de 4.8MHz, aunque la parte mas importante y que se esperaba son frecuencias múltiplos de la señal del inversor, en las figuras 3.41 y 3.42 observamos componentes en 500 Hz, 1Khz, 1.5Khz, 2Khz, etc. La señal del inversor para esta prueba fue de 500Hz y un ciclo de trabajo de 5

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

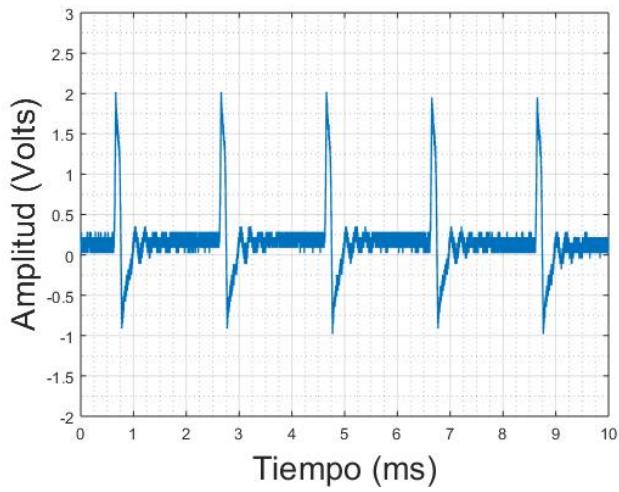


Figura 4.6: Zoom de voltaje acoplado a capacitor.

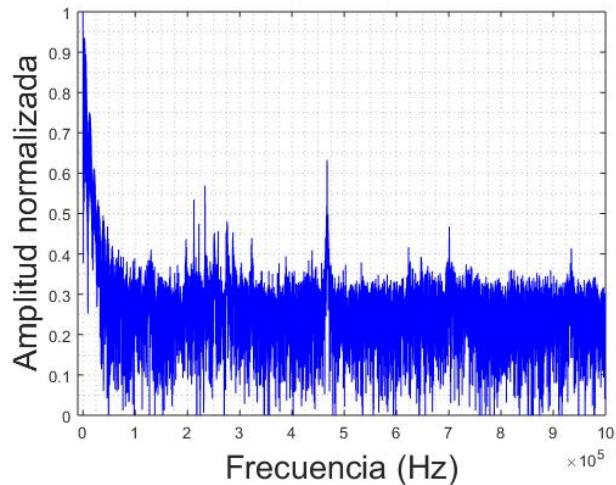


Figura 4.7: Transformada de fourier de señal de voltaje acoplado a un capacitor. 100 KHz por división.

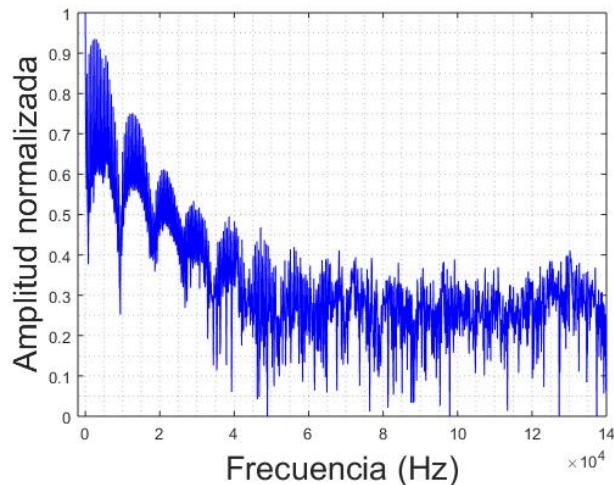


Figura 4.8: Transformada de fourier de señal de voltaje acoplado a un capacitor. 10 KHz por división.

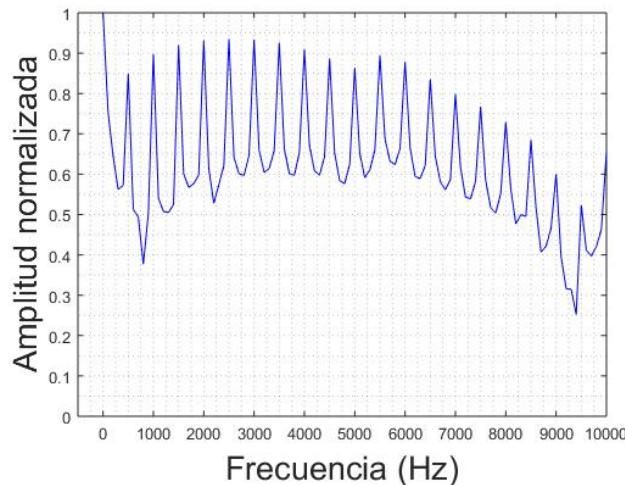


Figura 4.9: Transformada de fourier de señal de voltaje acoplado a un capacitor. 1 KHz por división.

Los resultados indican que se ha desarrollado una fuente que ha logrado superar los 3.8 KV, encontrando limitado nuestro análisis del ruido por la resolución de nuestras herramientas de medición, obteniendo una amplitud del rizo en el orden de los 3 V pico-pico con la anterior configuración. Este rizo corresponde al 0.375 %

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

de la señal.

Capítulo 5

Conclusiones

Se logro la construcción satisfactoria de una fuente de alto voltaje controlada digitalmente mediante un computador y de forma manual mediante un microcontrolador integrado. Los voltajes máximos alcanzados fueron mas de 3.8KV, limitados por nuestros instrumentos de medición. Con una potencia de hasta 20W y un rizo bastante bajo.

La caída de voltaje es el valor que representa el mayor problema en nuestro circuito, siendo necesario el desarrollo de una retroalimentación que ajuste el voltaje en tiempo real, reduciendo así dicha caída. Nuestro inversor y fuente de voltaje de CD fueron diseñados para soportar hasta 180W, así como también nuestro transformador de alto voltaje, por lo que el ajuste en potencia de esta retroalimentación se puede realizar digitalmente como futura continuación del proyecto.

Apéndice A

Código/Manuales/Publicaciones

A.1. Código pantalla táctil

```
//////////  
//programa para control de alto voltaje  
//mediante la implementacion de LCD TOUCH TFT de 3.2  
//  
//  
//  
//  
//////////  
#include <UTFT.h>  
#include <URTouch.h>  
  
//indicamos pines para hardware  
UTFT    myGLCD(ILI9341_16,38,39,40,41);  
URTouch myTouch( 6, 5, 4, 3, 2);  
  
//Definimos fuentes que utilizaremos  
extern uint8_t SmallFont[];
```

A. CÓDIGO/MANUALES/PUBLICACIONES

```
extern uint8_t BigFont[];
extern uint8_t SevenSegNumFont[];

//variables que estaremos utilizando
int x,y,pantalla=1,k,voltaje=1,p=0,p1=0,p2=0,p3=0,vout=0;
char dato[20];

//variables para tomar datos de UART

String str = "";
const char separator = ',';
const int dataLength = 2;
int data[dataLength];
char vin[20];
char current[20];

void botones1(){ /////////////////////////////////botones pantalla 1
    myLCD.setFont(BigFont);

    for (x=0; x<3; x++)
    {
        myLCD.setColor(0, 0, 255);
        myLCD.fillRoundRect (200, 10+(x*55), 310, 60+(x*55));
        myLCD.setColor(255, 255, 255);
        myLCD.drawRoundRect (200, 10+(x*55), 310, 60+(x*55));

    }

    for (x=0; x<2; x++)
    {
        myLCD.setColor(0, 0, 255);
        myLCD.fillRoundRect (10+(x*155), 175, 155+(x*155), 225);
    }
}
```

```
myLCD.setColor(255, 255, 255);
myLCD.drawRoundRect (10+(x*155), 175, 155+(x*155), 225);

}

myLCD.setBackColor(0, 0, 255);
myLCD.print("ON 2", 220 , 30);
myLCD.print("ON 3", 220 , 85);
myLCD.print("ON 1", 220 , 140);
//myLCD.print("UART ON", 185 , 195);
myLCD.print("V SET", 40 , 190);
myLCD.print("CONFIG", 190 , 190);

}

void marco1(int x1, int y1, int x2, int y2){ //////////////////////////////marcos pantalla 1
    myLCD.setColor(255, 0, 0);
    myLCD.drawRoundRect (x1, y1, x2, y2);
    while (myTouch.dataAvailable())
        myTouch.read();
    myLCD.setColor(255, 255, 255);
    myLCD.drawRoundRect (x1, y1, x2, y2);

}

void touch1(){ //////////////////////////////funciones de touch pan
```

A. CÓDIGO/MANUALES/PUBLICACIONES

```
myTouch.read();
x=myTouch.getX();
y=myTouch.getY();

if((x>=200) && (x<=310))
{
    if((y>=10) && (y<=60)){ //boton ON 2
        marco1(200,10,310,60);
    }

    if((y>=65) && (y<=115)){ //boton ON 3
        marco1(200,65,310,115);

    }

    if((y>=120) && (y<=170)){ //boton ON 1
        marco1(200,120,310,170);

    }

}

if((y>=175) && (y<=225))
{
    if((x>=10) && (x<=155)){ //boton V SET
        marco1(10,175,155,225);
        pantalla =2;
    }

    if((x>=165) && (x<=310)){ //boton config
        marco1(165,175,310,225);
    }
}
```

```
        }  
    }  
}  
  
/////////////////////////////// fin de pantalla 1  
  
/////////////////////////////// pantalla 2  
  
void botones2(){ ///////////////////////////////// botones pantalla 2  
    myLCD.setBackColor(0,0,255);  
    for (x=0; x<4; x++) //botones +  
    {  
        myLCD.setColor(0, 0, 255);  
        myLCD.fillRoundRect (10+(x*60), 10, 60+(x*60), 60);  
        myLCD.setColor(255, 255, 255);  
        myLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 10, 60+(x*60), 60);  
        myLCD.print("+", 27+(x*60), 27);  
    }  
  
    for (x=0; x<4; x++) //botones -  
    {  
        myLCD.setColor(0, 0, 255);  
        myLCD.fillRoundRect (10+(x*60), 170, 60+(x*60), 220);  
        myLCD.setColor(255, 255, 255);  
        myLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 170, 60+(x*60), 220);  
        myLCD.print("-", 27+(x*60), 190);  
    }  
  
    for (x=0; x<4; x++) //blanco  
    {
```

A. CÓDIGO/MANUALES/PUBLICACIONES

```
myLCD.setColor(255, 255, 255);
myLCD.fillRoundRect (10+(x*60), 70, 60+(x*60), 160);
myLCD.setColor(255, 0, 0);
myLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 70, 60+(x*60), 160);
// myLCD.print(p, 27+(x*60), 170);
}

myLCD.setColor(0, 0, 255); // botón set
myLCD.fillRoundRect(250,70,310,160);
myLCD.setColor(255, 255, 255);
myLCD.drawRoundRect(250,70,310,160);
myLCD.print("set" , 255,105);
}

void suma(int x1,int x2,int x3,int x4, int k, int w){ //////////////////////////////algoritmo subir o baj
    myLCD.setFont(SevenSegNumFont);
    myLCD.setColor(0, 0, 0);
    myLCD.setBackColor(255,255,255);
    int q;
    if(x1 == 1){      //////////////////////////////algoritmo kilos
        if(w==0 && p<9){
            vout=vout+1000;
            p=p+1;
            q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
            sprintf(dato,"%d",q);
        }
        if(w==1 && p>0){
            vout=vout-1000;
            p=p-1;
            q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
            sprintf(dato,"%d",q);
        }
    }
}
```

```
myLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
//      Serial.println(vout);
}

if(x2 == 1){ /////////////////////////////////algoritmo centena
    if(w==0 && p1<9){
        vout=vout+100;
        p1=p1+1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);
    }
    if(w==1 && p1>0){
        vout=vout-100;
        p1=p1-1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);
    }
}
myLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
//      Serial.println(vout);
}

if(x3 == 1){ /////////////////////////////////algoritmo decenas
    if(w==0 && p2<9){
        vout=vout+10;
        p2=p2+1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);
    }
    if(w==1 && p2>0){
        vout=vout-10;
        p2=p2-1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);
    }
}
```

A. CÓDIGO/MANUALES/PUBLICACIONES

```
    }

    myLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
    //Serial.println(vout);
}

if(x4 == 1){ ////////////////////////////////algoritmo unidades
    if(w==0 && p3<9){
        vout=vout+1;
        p3=p3+1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);
    }

    if(w==1 && p3>0){
        vout=vout-1;
        p3=p3-1;
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;
        sprintf(dato,"%d",q);

    }

    myLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
    // Serial.println(vout);
}

if(k==1){
    for(x=0 ; x<4 ; x++){
        sprintf(dato,"%d",p);
        myLCD.print(dato,20,90);
        sprintf(dato,"%d",p1);
        myLCD.print(dato,80,90);
        sprintf(dato,"%d",p2);
        myLCD.print(dato,140,90);
        sprintf(dato,"%d",p3);
        myLCD.print(dato,200,90);
    }
}
```

```
    }

}

void touch2(){ ///////////////////////////////touch pantalla 2
    myTouch.read();
    x=myTouch.getX();
    y=myTouch.getY();

    if((y>=10) && (y<=60)){ ///////////botones +
        if((x>=10) && (x<=60)){ //boton + kilos
            marco1(10,10,60,60);

            myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
            suma(1,0,0,0,0,0);

        }

        if((x>=70) && (x<=120)){ //boton + centena
            marco1(70,10,120,60);
            suma(0,1,0,0,0,0);

        }

        if((x>=130) && (x<=180)){ //boton + decena
            marco1(130,10,180,60);
            suma(0,0,1,0,0,0);
        }
    }
}
```

A. CÓDIGO/MANUALES/PUBLICACIONES

```
}

if((x>=190) && (x<=240)){ //boton + unidad
    marco1(190,10,240,60);
    suma(0,0,0,1,0,0);

}

if((y>=170) && (y<=220)){ ////////////botones -
    if((x>=10) && (x<=60)){ //boton + kilos
        marco1(10,170,60,220);
        suma(1,0,0,0,0,1);
    }

    if((x>=70) && (x<=120)){ //boton + centena
        marco1(70,170,120,220);
        suma(0,1,0,0,0,1);
    }

    if((x>=130) && (x<=180)){ //boton + decena
        marco1(130,170,180,220);
        suma(0,0,1,0,0,1);
    }

    if((x>=190) && (x<=240)){ //boton + unidad
        marco1(190,170,240,220);
        suma(0,0,0,1,0,1);
    }
}
```

```
if((x>=250) && (x<=310)){ // botón SET

    if((y>=70) && (y<=160)){
        marco1(250,70,310,160);
        pantalla =1;
        if(vout >=0 && vout <=1000){
            Serial.println(vout);
        }
    }

}

///////////////////fin pantalla set voltaje

void setup(){
    myGLCD.InitLCD();
    myGLCD.clrScr();
    myTouch.InitTouch();
    myTouch.setPrecision(PREC_HI);
    Serial.begin(9600);
    Serial.setTimeout(50);
}

void vinput(){

    str = Serial.readStringUntil('\n');
    for (int i = 0; i < dataLength ; i++)
    {
        int index = str.indexOf(separator);
```

A. CÓDIGO/MANUALES/PUBLICACIONES

```
data[i] = str.substring(0, index).toInt();
str = str.substring(index + 1);

}

for (int i = 0; i < sizeof(data) / sizeof(data[0]); i++)
{
    Serial.print(data[i]);
    Serial.print('\t');
}
Serial.println();

myLCD.setFont(BigFont);
sprintf(vin, "%d", data[0]);
sprintf(current, "%d", data[1]);
myLCD.print("      " ,10,50);
myLCD.print("      " ,10,70);
myLCD.setBackColor(0,0,0);
myLCD.setColor(255,255,255);
myLCD.print(vin ,10,50);
myLCD.print(current ,10,70);

}

void loop(){

/////////////////////////////pantalla 1
if(pantalla == 1){
    myLCD.fillScr(VGA_BLACK);
    botones1();
    myLCD.setFont(BigFont);
    char set[25];
    sprintf(set, "%d", vout);
    myLCD.setBackColor(0,0,0);
    myLCD.print(set ,10,100);
    myLCD.print("V set" ,100,100);
    myLCD.print("V out" ,100,50);
}
```

```
myLCD.print("mA out" ,100,70);
myLCD.print(vin ,10,50);
myLCD.print(current ,10,70);
while(true)
{
    if(myTouch.dataAvailable())touch1();
    if(pantalla == 2 )break;

    if (Serial.available()>0){vinput();}

}

//////////pantalla 2
if(pantalla == 2){
    myLCD.fillScr(VGA_BLACK);

    botones2();

    suma(0,0,0,0,1,0);
    while(true)
    {
        if(myTouch.dataAvailable())touch2();
        if(pantalla == 1)break;
    }
}

}
```

A.2. Diagrama electrónico IBT-2

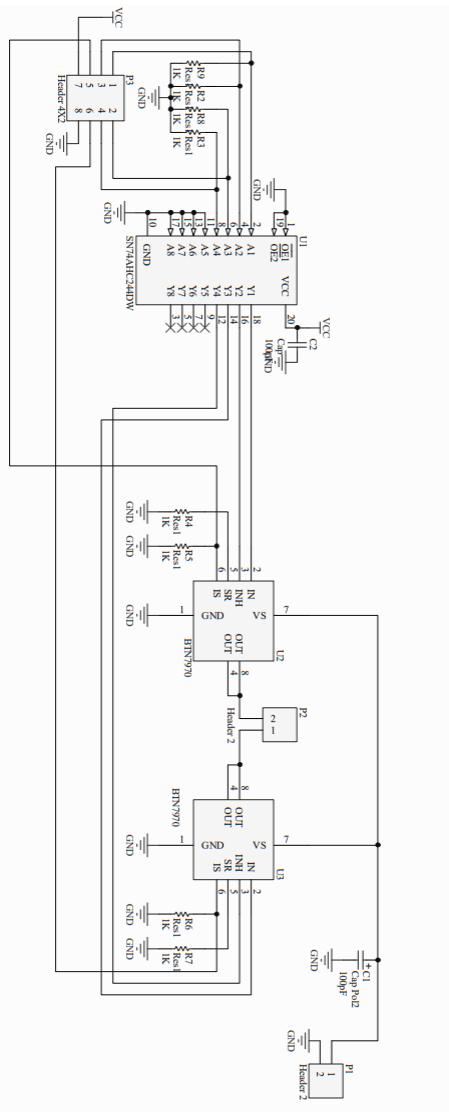


Figura A.1: diagrama puente H

Bibliografía

- [1] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, Proc. R. Soc. Lond. A 137, 229 (1932) [1](#), [3](#)
- [2] Aplicación de Microscopía Electrónica y Radiación Sincrotrón al Estudio de Materiales y Procesos Avanzados para la Salud y la Estética Dental. <http://grupsderecerca.uab.cat/gts/sites/grupsderecerca.uab.cat.gts/files/Tesis%20POA.pdf>
- [3] S. Cierjacks, Ed., Neutron Sources for Basic Physics and Applications (Pergamon Press Ltd., Oxford, 1983)
- [4] B. E. Leonard, in Proc. Workshop on High Intensity Neutron Generators, 44 (1972).
- [5] Gamma Irradiators For Radiation Processing . IAEA. 2005. [1](#)
- [6] Nénot, J.-C., Radiation accidents over the last 60 years. Journal of Radiological Protection, 2009. 29(3): p. 301. [1](#)
[2](#)
- [7] Ramos S., de Urquijo Carmona J., Meléndez L., Muñoz A., Barocio S., Chávez E., Balderas E., Godínez E., Valencia R., Diseño del Tokamak Novillo, Revista Mexicana de Física, 29, 551 (1983). [2](#)
- [8] <https://www.gob.mx/inin/> [2](#)
[2](#)
- [9] Everhart, E. and P. Lorrain, The Cockcroft-Walton voltage multiplying circuit. Review of Scientific Instruments, 1953. 24(3): p. 221-226. [3](#)
- [10] Bryant, P., A brief history and review of accelerators. 1994. [7](#)
- [11] Hamm, R.W. and M.E. Hamm, Industrial accelerators and their applications. 2012: World Scientific. [8](#)
- [12] Almén A., Ahlgren L., Mattsson S. Absorbed Dose to Technicians Due to Induced Activity in Linear Accelerators for Radiation Therapy. Phys Med Biol 1991; 36(6):81522. .
- [13] fundamental physical constants. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?tevj> [9](#)
- [14] Standard for Determining Current-Carrying Capacity In Printed Board Design. <http://electronica.ugr.es/~amroldan/cursos/2014/pcb/modulos/temas/IPC2152.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

- [15] Trasformadores. Miguel Angel Rodríguez Pozueta Doctor Ingeniero Industrial <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos.pdf> xi, 11, 12
- [16] Full-bridge inverter phase-shifted PWM (FBPS-PWM) zero voltage switching (ZVS) and high frequency transformer as part of DC-DC converter 311/100V 300W. F. Danang Wijaya <https://ieeexplore.ieee.org/document/7045266> 12
- [17] Design concept of a high power high frequency power supply for feeding 500 kV, 100 mA cockcroft-walton generator. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8310445> 20
- [18] Application of Magnetic Energy Recovery Switch (MERS) to power supply systems of nuclear fusion device. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5226371>
- [19] Kent Farnsworth on His Father's Electronic Television and Fusion Research. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4563911>
- [20] Imagen de fusor nuclear. <https://makezine.com/projects/make-36-boards/nuclear-fusor/>
- [21] Boylestad, R.L. and L. Nashelsky, Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. 2009: Pearson Educación de México. 35
- [22] ANÁLISIS DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO SIN DISTRIBUIDOR (DIS) <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3995/1/T-ESPEL-0212.pdf> xi, 23
- [23] High Current PN Half Bridge NovalithIC http://www.robotpower.com/downloads/BTS7960_v1.1_2004-12-07.pdf xi, xi, 39, 40
- [24] Bushong, S. C. (2005). Manual de radiología para técnicos. Barcelona: Elsevier España. xi, 24
- [25] Esquematico de control BTN7970. <https://www.elecrow.com/download/IBT-2%20Schematic.pdf> 39
- [26] BTS 7960 High Current PN Half Bridge NovalithIC. http://www.robotpower.com/downloads/BTS7960_v1.1_2004-12-07.pdf 39
- [27] Función de velocidad para comunicación serial. <https://www.arduino.cc/en/Reference/StreamSetTimeout> 47